

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Приладобудівний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Прилади та системи орієнтації і навігації

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»  
УДК 621.317

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 20\_\_ р.

## Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціальності)

151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

на тему Система стабілізації обладнання з цифровим регулятором

Виконав: студент 6 курсу, групи ПГ-61М  
(шифр групи)

Осовцев Андрій Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник Зав. каф., д.т.н., проф. Бурау Н.І.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Розділ 5 доцент к.т.н. Бояринова К.О.

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент в.о. зав. кафедри НАЕПС, д.т.н., проф. Защепкіна Н.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент

(підпис)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складає 97 сторінок, в ній містяться 52 ілюстрації, 26 таблиць і 36 використаних джерел.

**Актуальність:** На сьогоднішній день актуальною є проблема підвищення точності та швидкодії систем стабілізації обладнання, яке встановлюється на рухомих об'єктах і знаходиться в умовах комплексного впливу зовнішніх збурень, які обумовлені середовищем використання та динамікою руху об'єкта, а також недоліками встановлення обладнання. Важливою проблемою є створення адаптивної системи, яка може використовуватися при різноманітних зовнішніх збуреннях та для різноманітного типу обладнання.

Магістерська дисертація виконана відповідно до основних напрямків наукових досліджень кафедри.

**Мета:** забезпечення характеристик точності та швидкодії СС при русі об'єкта по місцевості з різним профілем поверхні.

**Завдання:**

1. Огляд стану та шляхів вдосконалення систем стабілізації;
2. Аналіз системи стабілізації з неперервним регулятором;
3. Аналітичне конструювання та дослідження характеристик цифрового регулятора;
4. Дослідження характеристик системи стабілізації при випадкових впливах.

**Об'єкт:** процес стабілізації обладнання на рухомих об'єктах.

**Предмет:** методи та засоби підвищення точності і швидкодії системи стабілізації.

**Методи дослідження:** Для дослідження використано методи теорії автоматичного керування, методи аналізу дискретних систем стабілізації і орієнтації, методи комп'ютерного моделювання.

**Наукова новизна:**

1. Встановлено залежності середньо квадратичного відхилення сигналу аналогової системи стабілізації обладнання від класу дороги за рівнем нерівності;
2. Встановлено залежності середньо квадратичного відхилення сигналу системи стабілізації обладнання з цифровим ПІД-регулятором від класу дороги за рівнем нерівності.

**Практичне значення:** Забезпечення необхідних показників точності і швидкодії системи стабілізації для різних класів доріг; Алгоритмічне і програмне забезпечення для моделювання вихідного сигналу системи стабілізації рухомого об'єкта для різних класів доріг.

**Апробація результатів дисертації (виступи на науково технічних конференціях):**

1. Дев'ята міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», Київ, НАУ, 2016;

2. II Всеукраїнська науково-практична конференція «Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку», Луцьк, 2016;
3. Науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», Київ, 2018

**Публікації:**

1. Бурау Н.І. Аналіз впливу нерівностей місцевості на ефективність стабілізації обладнання рухомого об'єкта / Н.І. Бурау, А.І. Вознюк, А.В. Осовцев, А.С. Шаблій // Вісник інженерної академії України— 2017. — № 2. — С. 220-225.
2. Осовцев А.В. Порівняння цифрового та аналогового регулятора у системі стабілізації обладнання / А.В. Осовцев, А.І. Вознюк // Погляд у майбутнє приладобудування: Збірник статей XI науково-практичної конференції студентів та аспірантів/ Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2018. — С. 45-48.

**Ключові слова:** система стабілізації, цифровий регулятор, ПІД-регулятор, випадковий вплив, мікропрофіль дороги, частотні характеристик, часові характеристики, типові збурення.

## ABSTRACT

The master's thesis consists of 97 pages, it contains 52 illustrations, 26 tables and 36 sources used.

**Actuality:** To date, the problem of increasing the accuracy and speed of equipment stabilization systems, which is installed on moving objects and is in the conditions of the complex influence of external perturbations, which are caused by the environment of use and the dynamics of the object movement, as well as the disadvantages of installing equipment, is actual. An important problem is the creation of an adaptive system that can be used with various external disturbances and for various types of equipment.

The master's thesis is executed according to the main directions of scientific research of the department.

**Purpose:** to provide the characteristics of the accuracy and speed of the SS when the object is moving around the area with different profile of the surface.

**Task:**

1. Review of the state and ways of improvement of stabilization systems;
2. Analysis of the stabilization system with a continuous regulator;
3. Analytical design and research of the characteristics of the digital controller;
4. Research of characteristics of the system of stabilization at random influences.

**Object:** the process of stabilization of equipment on moving objects.

**Subject:** methods and means of increasing the accuracy and speed of the stabilization system.

**Methods of research:** For the study methods of the theory of automatic control, methods of analysis of discrete systems of stabilization and orientation, methods of computer modeling are used.

**Scientific novelty:**

1. The dependencies of the mean square deviation of the signal of the analog system of equipment stabilization from the road class on the level of inequality are established.
2. The dependencies of the mean square deviation of the signal of the equipment stabilization system with the digital PID-regulator from the road class on the level of inequality were established.

**Practical significance:** Providing the necessary indicators of accuracy and speed of the stabilization system for various classes of roads; Algorithmic and software for modeling the output signal of a system for stabilizing a moving object for different road classes.

**Approbation of the results of the dissertation (presentations at scientific and technical conferences):**

1. Ninth International Scientific and Practical Conference "Integrated Intellectual Robotics Complexes", Kyiv, NAU, 2016;
2. II All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Instrument-making and Metrology: Modern Problems, Development Trends", Lutsk, 2016;
3. Scientific-practical conference of students and post-graduate students "A View to the Future of Instrumentation", Kyiv, 2018

**Publications:**

1. Bouraou N.I. Analysis of the influence of inequalities of the area on the efficiency of stabilization of equipment of a moving object / N.I. Bouraou, A.I. Voznyuk, A.V. Osoltsev, A.S. Chabliy // Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine - 2017. - No. 2. - P. 220-225.
2. Osoltsev A.V. Comparison of digital and analog controller in the system of equipment stabilization / A.V. Osoltsev, A.I. Voznyuk // A look at the future of instrument making: A collection of articles of the XI scientific and practical conference of students and postgraduates / National. tech. university of Ukraine "KPI". - Kyiv, 2018. - P. 45-48.

**Keywords:** stabilization system, digital regulator, PID-regulator, random influence, microprofile of the road, frequency characteristics, time characteristics, typical disturbances.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	10
ВСТУП .....	11
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ .....	13
1.1 Загальні характеристики систем стабілізації .....	13
1.2 Тенденції розвитку системи стабілізації обладнань .....	17
1.2.1 Вдосконалення елементної бази систем стабілізації та наведення .....	18
1.2.2 Вдосконалення алгоритмів керування систем стабілізації та наведення .....	20
1.3 Аналіз попередніх досліджень .....	21
1.4 Мета і завдання дослідження .....	24
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ З НЕПЕРЕРВНИМ РЕГУЛЯТОРОМ .....	25
2.1 Опис та структурна схема системи стабілізації .....	25
2.1.1 Аналіз елементної бази .....	26
2.1.2 Аналіз стійкості .....	28
2.2 Побудова логарифмічних частотних характеристик .....	29
2.3 Дослідження часових характеристик .....	30
2.4 Моделювання та оцінка точності системи стабілізації при типових впливах .....	31
Висновки до розділу 2 .....	37
РОЗДІЛ 3 АНАЛІТИЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА .....	38
3.1 Аналітичний розрахунок коефіцієнтів аналогового регулятора .....	38
3.2 Перетворення аналогового регулятора на цифровий регулятор .....	41
3.3 Побудова логарифмічних частотних характеристик .....	42
3.4 Дослідження часових характеристик .....	43
3.5 Порівняння попереднього регулятора, аналогового та цифрового ПІД-регулятора .....	44
3.6 Моделювання системи стабілізації з цифровим регулятором при типових впливах .....	45

Висновки до розділу 3 .....	51
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРИ ВИПАДКОВИХ ВПЛИВАХ .....	53
4.1 Аналіз випадкових впливів на об'єкт стабілізації .....	53
4.2 Моделювання та аналіз реакції системи стабілізації з аналоговим регулятором на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта .....	55
4.3 Моделювання та аналіз реакції системи стабілізації з цифровим регулятором на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта .....	60
Висновки до розділу 4 .....	65
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ З ЦИФРОВИМ РЕГУЛЯТОРОМ» .....	66
5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології) .....	66
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту .....	67
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	68
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	75
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	77
Висновки до розділу 5 .....	80
ВИСНОВКИ .....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	83
Додаток А .....	87
Додаток Б .....	91
Додаток В .....	95

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ССН - Система стабілізації та наведення

ПД-регулятор - Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор

ГС - Гіростабілізатор

СГС - Силовий гіростабілізатор

БГС – Безпосередні гіростабілізатори

ІГС - Індикаторні гіростабілізатори

ЕГП – Електрогідравлічний привід

MEMS - Мікро-електромеханічні системи

СКВ - Середньо квадратичне відхилення



## ВСТУП

В магістерській дисертації за напрямком досліджень «Система стабілізації обладнання з цифровим регулятором» розглянуто сучасний стан систем стабілізації та наведення (ССН) обладнання на рухомих об'єктах, а також проведено огляд основних методів, які використовуються для вирішення актуальної проблеми вдосконалення систем стабілізації.

Проблема підвищення точності та швидкодії систем стабілізації та наведення обладнання, яке встановлюється на рухомих об'єктах є дуже актуальною. Ці об'єкти можуть бути наземного, морського та повітряного базування, характеристиками якого є малі та середні швидкості руху, широкий діапазон масо-габаритних показників. Особливостями експлуатації яких є наявність зовнішніх збурень, які залежать від середовища використання та динаміки руху об'єкта, вібраційні збурення від двигуна під час його роботи, а також внаслідок технологічних і конструктивних неточностей під час встановлення обладнання на об'єкт.

В залежності від середовища від середовища використання можна розділити об'єкти на три основні класи: наземний(гусеничний та колісний транспорт, ручне обладнання); морський (катери, човни (підводні), кораблі); повітряний (літаки, гелікоптери, ракети, безпілотні літальні апарати). Для кожного класу характерні певні особливості, в залежності від навколишнього середовища. Для наземного класу об'єктів характерні малі або середні швидкості руху, широкий діапазон масо-габаритних показників, висока частота зовнішніх збурень які викликані нерівностями профілю дороги. Для об'єктів морського класу характерні малі та середні швидкості, широкий діапазон масо-габаритних характеристик стабілізованого обладнання. Зовнішні збурення виникають внаслідок дії хвиль та вітру. Для повітряного класу характерні високі перевантаження, висока маневреність та швидкість. Зазвичай об'єкти стабілізації мають невеликі масо-габаритні показники. Загалом для усіх класів об'єктів зовнішні збурення є багатовимірними випадковими процесами, які потребують математичного опису.

Для забезпечення необхідних динамічних характеристик в ССН використовуються регулятори. Регулятори бувають, як аналоговими так і цифровими. Перспективними та найбільш популярними на сьогодні є пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори (ПІД-регулятори). Перспективним є шлях переходу від класичної теорії автоматичного керування до сучасної, характерною рисою цього є використання цифрових (дискретних) регуляторів. Від ССН з цифровим регулятором можна легко перейти до дискретної системи. Дискретні системи характеризуються відсутністю дрейфу нуля, високим захистом від перешкод і високою стійкістю до різноманітних збурень, а також менші масо-габаритні показники. Закон керування в них реалізується програмно, що дозволяє швидко

перебудовувати параметри регуляторів, а при необхідності і їх структуру, а також дозволяє розширити функції керування. Завдяки адаптивній ССН можна буде легко переналаштовувати систему в залежності від різних класів об'єктів і розширити границі використання розробленої ССН, що є невирішеною проблемою сучасних ССН.

В магістерській дисертації досліджується підвищення точності та швидкодії системи стабілізації обладнання на рухомих об'єктах. Проводяться дослідження існуючої системи стабілізації з неперервним регулятором, а також системи з створеним цифровим ПД-регулятором, на основі яких аналізується можливість використання створеного цифрового ПД-регулятора. Використання цифрового ПД-регулятора в системі стабілізації дає можливість у подальшому перейти до створення системи з адаптивним керуванням, що значно розширює можливості використання системи при різноманітних зовнішніх збуреннях, а також для різноманітного типу обладнання, яке стабілізується.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД СТАНУ ПРОБЛЕМИ

У даному розділі розглянуто загальні характеристики гіростабілізаторів. А також розглянуто сучасні наукові праці, присвячені розробці та дослідженню гіростабілізаторів та цифрових регуляторів.

#### 1.1 Загальні характеристики систем стабілізації

Гіростабілізатори (ГС) призначені для стабілізації корисного навантаження, в якості якого можуть виступати різні об'єкти стабілізації і керуванням їх положенням в заданій системі координат і просторі [1].

Об'єктами стабілізації можуть виступати.

1. Радіолокаційні антени;
2. Оптична апаратура та її вузли (кіноапаратура, фотоапаратура, телескопи, призми і т.п.);
3. Частини ракет і снарядів;
4. Акселерометри і магнітометри які використовуються, як окремо так і в інерційних навігаційних систем;
5. Турельні і гарматні установки (наприклад гармати встановленні на літаках та військовому транспорті);
6. Об'єкти що рухаються (морські судна, космічні апарати і т.п.)
7. Вимірювальні пристрої різноманітного призначення, які потребують стабілізації.

Завдання ГС - стабілізувати корисне навантаження в заданій системі координат. Якщо взяти в якості системи координат прямокутну декартову, то в залежності від того, навколо скількох осей треба стабілізувати положення об'єкта, і розрізняють типи ГС. Можна назвати три основних типи ГС, які описані у [1]:

- одновісні;
- двовісні;
- тривісні.

Серед існуючих на сьогоднішній день ССН найбільшої популярності здобули двовісні та тривісні системи, які будуються на зовнішніх та внутрішніх карданних підвісах. Одновісні ГС використовуються не часто і є менш популярними [1].

Як приклад застосування одновісного ГС - стабілізація оптичної осі фотоапарата щодо вертикальної площини, або стабілізація вимірювального пристрою гіроінклінометра щодо

вертикальної площини, що проходить через повздовжню вісь гіроінклінометра (для визначення координат точок свердловини) [1].

Двовісні ГС: центральна гіровертикаль (ЦГВ), яка будується за схемою двовісного, силового ГС; малогабаритна гіровертикаль (МГВ), яка побудована по аналогічній схемі, але з використанням елементів з меншими масо габаритними показниками (ЦГВ і МГВ стабілізують положення платформи відносно площини горизонту) [1].

Тривісні ГС призначені для просторової стабілізації корисного навантаження. Можуть бути використані, наприклад, в балістичній ракеті, де корисне навантаження, встановлене на платформу, стабілізується відносно інерціальної стартової системи координат після старту ракети [1].

За принципом дії ГС можуть бути розділені на 4 типи:

- Безпосередні гіростабілізатори (БГС);
- Силкові гіростабілізатори (СГС);
- Індикаторно - силкові гіростабілізатори (ІСГС);
- Індикаторні гіростабілізатори (ІГС);

Безпосередні гіростабілізатори виконують поставлене завдання стабілізації, використовуючи тільки гіроскопічний момент для повної або часткової компенсації збурюючого моменту, що діє на об'єкт стабілізації. Як приклад побудови БГС в [1] розглянуто стабілізатор хитавиці для помірної бортової хитавиці корабля. Розглянемо найпростіший тип – заспокоювач хитавиці Шліка, кінематичну схему якого наведено на рис.1.1.

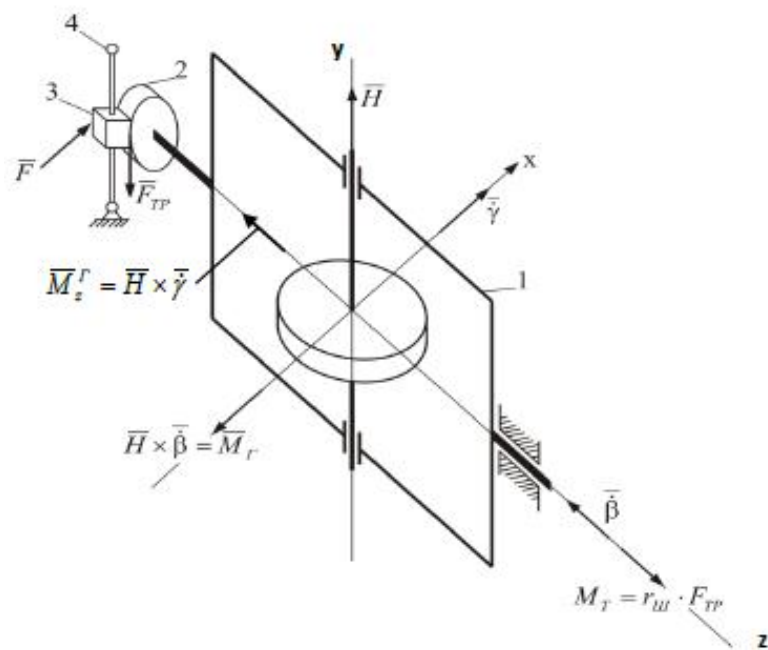


Рис.1.1 Кінематична схема гіростабілізатора

На кінематичній схемі (рис. 1.1) введені такі позначення:

- Гіроблок з двома ступенями свободи;
- Гальмівний шків;
- Гальмівна колодка;

- Важіль для регулювання сили притискання ( $F$ ) колодки до шківа. Коли колодка притискається до шківа, то створюється сила тертя  $F_{TP}$  і момент тертя  $M_{TP}$  щодо осі підвісу гіроблока;

$x$  - поздовжня вісь об'єкта. Коли є бортова хитавиця то коливання відбуваються навколо поздовжньої осі.

У даній конструкції момент який спрямований по осі стабілізації створюється тільки гіроскопом, що означає, що даний пристрій є безпосереднім одновісним ГС.

В СГС збурюючи момент повністю компенсується за допомогою гіроскопічного моменту і моменту, який створюється двигуном розвантаження таким чином, що сума цих моментів в кожен момент часу дорівнює моменту збурення [1].

Індикаторно - силові гіростабілізатори близькі за кінематичною схемою до СГС, але компенсація збурюючого моменту в основному відбувається моментом який створюється двигуном розвантаження. Якщо момент двигуна буде дорівнює нулю, то гіроскопічний момент не зможе повністю компенсувати момент збурення на відміну від СГС [1].

В ІГС компенсація збурюючого моменту відбувається повністю за рахунок моменту який створюється двигуном розвантаження, так як збурюючий момент, прикладений до об'єкта стабілізації, не призводить до прецесії гіроскопа [1].

Розрізняють також ГС по типу приводу. Під приводом мають на увазі контур пристроїв, який за допомогою виконавчого пристрою (двигуна) створює момент розвантаження. Існують наступні типи приводу [1]:

- Електричний привід (ЕП);
- Електропневматичний привід (ЕПП);
- Електrogідравлічний привід (ЕГП).

Вибір типу приводу залежить від наступних факторів: навантаження, необхідна потужність, яку привід повинен розвивати для компенсування збурюючого моменту. Найбільшу питому потужність мають ЕГП, які використовуються, наприклад, для стабілізації гарматного ствола танка, тому що на відміну від інших приводів його маса та габарити менше при однаковій потужності. Електропневматичний тип приводу має певні переваги перед ЕГП, починаючи з певної потужності. Його зручніше використовувати, тому що в ньому немає мастила. Електричний привід зручніше в експлуатації тому що не містить додаткових рідин та

газів. Існує два основних типи, які діляться за типом стуму: приводи з постійним струмом і приводи зі змінним струмом. Можуть використовуватись як з редуктором так і без нього.

Якщо використовується редуктор у контурі стабілізації, то може використовуватись як один стабілізуючий мотор так і два стабілізуючих мотора на одну вісь стабілізації [1].

Схема побудови приладу в контурі стабілізації якого використовується два стабілізуючих мотора наведено у [1]: стабілізуючі мотори включаються в протилежних напрямках. Вони створюють моменти, протилежні за знаком; при нульовому сигналі корекції моменти починають врівноважувати один одного і як наслідок сумарний момент корекції дорівнює нулю. При появі сигналу корекції, то, в залежності від полярності сигналу, один з двигунів послабить свій вплив, а інший посилить у загальний момент.

У такому випадку сумарний момент буде мати нульове значення і компенсувати момент збурення. Але час на компенсування люфту в редукторі не буде витрачатись, тому що редуктор постійно знаходиться у напруженому стані, на відміну від схем які будуються з одним стабілізуючим мотором. Ці переваги надають більшу точність системі стабілізації [1].

Об'єкт стабілізації зазвичай знаходиться на спеціальній платформі, яка має назву – стабілізуюча платформа. Тип підвісу може бути внутрішнім або зовнішнім. Основні відмінності полягають у масо габаритних показниках, які у внутрішнього типу підвісу значно менші.

Гіростабілізатори також можуть розрізнятися за типом використовуваного гіроскопу. Розрізняють також ГС по типу гіроскопів. Вони можуть бути двоступеневими та триступеневими [1].

Двоступеневі гіроскопи поділяються на:

- Датчик кутової швидкості (механічний, волоконно-оптичний, лазерний);
- Поплавковий інтегруючий гіроскоп;
- Гіроблок з електромагнітним підвісом.
- Гіроблок з газовим підвісом;
- Гіроблок з обертовими опорами.

Триступеневі гіроскопи:

- Вільний гіроскоп;
- Поплавковий гіроскоп;
- Динамічно налагоджуваний гіроскоп;
- Гіроскоп з електричним підвісом.

На відмінну від датчику кутової швидкості або поплавкового гіроскопу, гіроблок немає додаткового навантаження по осі підвісу, за винятком моменту тертя, який зменшують завдяки використанню різних типів підвісу (електромагнітний, газовий або обертові опори).

Типовими умовами експлуатації ГС є робота на хиткій основі [1]. У загальному випадку на ГС діють шкідливі моменти сил як по осі прецесії, так і по осі стабілізації. Збурюючі моменти, які діють по осі прецесії мають вигляд постійної складової по знаку і періодичної складової, що змінюється з частотою хитамиці. З принципу дії ГС, постійний момент по осі прецесії викликає відхилення стабілізованою платформи з постійною швидкістю. Дія цього моменту може бути скомпенсована моментом системи корекції. Вплив періодичної складової моменту проявляється у вигляді коливань платформи з малою амплітудою.

## **1.2 Тенденції розвитку системи стабілізації обладнань**

На сьогоднішній день найпоширенішими ССН є двовісні та тривісні системи, які в своїй конструкції містять зовнішні або внутрішні карданні підвіси. Дослідження та розробка таких систем широко описана в сучасних наукових працях [2].

В редукторних системах стабілізації та наведення для передачі високої кутової швидкості обертання валу виконавчого двигуна в більш низьку швидкість вихідного валу зі збільшенням обертового моменту використовуються спеціальні системи механічних передач. Системи такого типу містять у своїй конструкції додаткові елементи, які в свою чергу ускладнюють виготовлення та експлуатацію таких систем, а також виникають додаткові проблеми (пружні деформації, зазори і люфти в редукторних передачах). Щоб створити систему з великими масо-габаритними показниками та достатніми критеріями якості керування потрібно в алгоритмах керування використовувати нові методи і підходи [2].

В ССН, в яких немає редуктора, вихідними величинами є швидкість обертання та обертовий момент на валу двигуна. Об'єкт стабілізації безпосередньо знаходиться на валу двигуна, це значно спрощує конструкцію системи та алгоритм керування. Але при цьому висуваються досить жорсткі вимоги до параметрів та характеристик двигуна.

Останні досягнення в області цифрової техніки та цифрових технологій, а також застосування системного підходу для проектування систем керування з високими показниками якості керування, дозволяють удосконалювати існуючі методи та використовувати нові підходи у вирішенні задач стабілізації та наведення обладнання [2]. Інтенсивний розвиток мікроелектроніки та обчислювальної техніки, значне розширення можливостей сучасних обчислювальних пристроїв за їх відносної дешевизни є основою для застосування сучасного адаптивного підходу в автоматичних системах, який зменшує невизначеність на основі використання інформації, отриманої в процесі керування. Використання такого підходу дозволяє створювати нові та вдосконалювати існуючі методи для побудови ССН обладнання на рухомих об'єктах в залежності від зміни динамічних характеристик об'єкта керування.

### 1.2.1 Вдосконалення елементної бази систем стабілізації та наведення

На сьогоднішній день інтенсивного розвитку набула мікроелектроніка та мікропроцесорна техніка, що дозволяє використовувати сучасні цифрові пристрої в ССН і відмовитися від аналогових компонентів. Завдяки цьому можна зменшити масо-габаритні показники та вдосконалити функціональні можливості. Це є одним із напрямків вдосконалення ССН.

Для визначення положення об'єкту стабілізації відносно основи та Землі необхідно використовувати відповідні вимірювальні пристрої. Будь-яка система стабілізації містить у своєму складі гіроскопічні вимірювачі, завдяки яким система отримує інформацію про положення об'єкту, лінійні та кутові переміщення, швидкості та прискорення. Інформацію стосовно лінійного та кутового прискорення надають акселерометри. Основні характеристики на які потрібно звертати увагу при виборі гіроскопічного вимірювача це діапазон вимірювання, стабільність та значення масштабного коефіцієнту, масо-габаритні характеристики та експлуатаційні параметри [3]. При розробці ССН використовуються наступні типи гіроскопів: мікромеханічні, динамічно налагоджувальні, лазерні, волоконно-оптичні, поплавкові, твердотісно хвильові, електростатичні, гіроскопи на магнітних та повітряних підвісах. Якщо при розробці ССН головна увага приділяється максимальній точності, необхідно використовувати електростатичні, поплавкові та гіроскопи на магнітних та повітряних підвісах, тому що вони можуть забезпечити мінімальні значення дрейфу нуля, високі динамічні характеристики, а також найбільшу точність. Але ці пристрої мають певні складнощі при виробництві та експлуатації, тому їх найчастіше використовують у складних авіаційних та морських безплатформних інерційних навігаційних системах (літаки, підводні човни, ракети, морські судна). В системах навігації та стабілізації широко застосовуються динамічно налагоджувальні гіроскопи, тому що вони мають хороші характеристики точності, невеликі масо-габаритні показники і широкий діапазон робочих температур [4]. Але вони мають систематичні похибки, які виникають через конструктивні особливості і неточності при виготовленні і для їх врахування потрібно вводити необхідні поправки. Якщо система середньої або вищої точності, то використовуються лазерні, волоконно-оптичні та твердотісно хвильові гіроскопи. Вони мають такі головні переваги, як відсутність механічних елементів, що обертаються, широкий діапазон вимірювання та високу точність. Але внаслідок збільшення точності в волоконно-оптичних і лазерних гіроскопах збільшуються масо-габаритні показники. Також недоліком є складні технологічні процеси при їх виготовленні.

Використання технологій мікро-електромеханічних систем (MEMS) є одним із перспективних напрямків вдосконалення ССН. Під MEMS технологіями розуміється



поєднання в одній конструкції механічних елементів та електроніку завдяки використанню мікроелектроніки та технологій мікроелектромеханічних систем. Сучасні MEMS компоненти дуже широко застосовуються в різноманітних системах, а також при виробництві акселерометрів і гіроскопів [5]. Основні переваги MEMS датчиків полягають у мінімальних масогабаритних показниках, простоті використання, а також у дешевизні. Щоб їх використовувати у системах високої точності потрібно компенсувати дрейф нуля. У сучасних вимірювачах використовуються певні вбудовані засоби, які можуть поліпшувати характеристики, як приклад можна навести системи термокомпенсації. Використання методів та принципів адаптивного керування режимами роботи MEMS датчиків дозволяє забезпечити наближення реальних характеристик до бажаних. На сьогоднішній день деякі MEMS датчики відносяться до класу середньою точності, і це поширює їх використання у нових системах стабілізації.

До виконавчих двигунів які використовуються у ССН висуваються наступні головні вимоги: точність, швидкодія, надійність, коефіцієнт корисної дії, діапазон регулювання, ефективне відведення тепла, механічна характеристика двигуна [6]. При використанні електроприводу, який будується на основі електродвигуна постійного або змінного струму та редуктора, майже не дає можливостей у підвищенні таких характеристик, як точність, швидкодія і надійність. Використання моментних електричних двигунів, в яких потужність досягається за рахунок високого крутного моменту, а швидкісні показники обираються за необхідним значенням максимальної швидкості об'єкта регулювання є дуже перспективним напрямком вдосконалення елементної бази сучасних ССН. Якщо використовується моментний двигун то відпадає потрібність у використанні редуктора, що виключає недоліки які пов'язані з редуктором і забезпечує гарні властивості електроприводу: висока точність, висока динаміка, плавність ходу, більшу жорсткість механічної системи, високу частоту власних коливань і стабілізацію ротора двигуна з об'єктом керування, якщо система робить на рухомій основі.

В сучасних автоматичних системах обов'язково використовується мікропроцесорна техніка, що як наслідок висуває певні вимоги до їх характеристик та можливостей. При роботі ССН виконується багато обчислювань в режимі реальному часі: отримання інформації з вимірювальних датчиків, їх обробка, перехід від системами координат, керування іншими компонентами, які використовуються у системі. Але на сьогоднішній час існує дуже багато різновидів мікропроцесорних систем, які володіють потрібними обчислювальними характеристиками і задовольняють вимогам вирішення завдань стабілізації, і можуть покращувати певні характеристик систем стабілізації і розширювати область застосування. А також це дозволяє використовувати більш складні алгоритми керування.

### 1.2.2 Вдосконалення алгоритмів керування систем стабілізації та наведення

Сучасні системи автоматичного керування різноманітного застосування (слідкуючі системи, програмні системи. Системи стабілізації) будуються на принципах і підходах класичної теорії автоматичного керування. Все більше починають використовуватись дискретні пристрої, тобто використання сучасної теорії дискретних систем керування. В ССН використовуються коригувальні пристрої – регулятори (П, ПД і т.п.), що дозволяє підвищувати точність і забезпечувати необхідних показників якості керування. Синтез регуляторів можна вважати дуже важливим алгоритмічним завданням при розробці систем стабілізації. ПД – регулятор є одним із самих популярних регуляторів, а також його модифікації, які використовуються у системах стабілізації. Близько 90...95% , як зазначено у роботі [7,8], регуляторів, що експлуатуються сьогодні, використовують ПД-алгоритм. Основні переваги полягають у простоті реалізації, можливості налаштування в широких межах та задовільні показники якості керування. Але значний вплив на якість керування завдають зовнішні збурення, шуми і завади, що також ускладнює реалізацію.

Для випадку довільного руху об'єкта в зазначеній вище роботі проведений синтез високоточної системи стабілізації і наведення, зокрема, розроблена математична модель та запропонована методика синтезу регулятора ССН, здатного контролювати миттєві значення помилки стабілізації в умовах довільних маневрів об'єкта, реалізовано цифровий алгоритм керування. Дослідження показали, що використання синтезованого цифрового регулятора забезпечує усунення похибок без втрати якості керування.

Системи стабілізації обладнання які використовуються на рухомих об'єктах, мають складні динамічні характеристики, характеризуються наявністю неконтрольованих завад і шумів, а також описуються нелінійними залежностями. Сукупність усіх зазначених вище факторів не дозволяє досягти необхідних показників якості керування. Використання традиційних підходів передбачає створення відповідної системи стабілізації для кожного класу рухомого об'єкта. Постійно зростають вимоги до характеристик систем керування, і щоб їм відповідати потрібно постійно вдосконалювати автоматичні системи керування. В останній час широкої популярності набули методи робастного та адаптивного керування. Наприклад, для усунення зовнішніх збурень та завад розробляється спеціальний робастний пропорційно-інтегруючий регулятор [9].

Синтез адаптивних систем керування для різноманітних нелінійних, невідомих або випадкових впливів, які впливають на об'єкт керування є мало дослідженим. Методи робастного керування обмежуються лінійними системами. Є необхідність в розробці регулятора для системи стабілізації, який буде відповідати показникам точності та швидкодії,

а також використовувати сучасні принципи адаптивної теорії керування, для універсальності системи. Також перспективним шляхом вдосконалення є використання штучних нейронних мереж [10]. Основною їх перевагою є здатність до навчання, що дозволяє вирішувати складні задачі керування. Використання нейронів з нелінійною функцією керування дозволяє вирішувати завдання керування нелінійними об'єктами. Розробляються регулятори з використанням штучних нейронних мереж – нейрорегулятори.

Щоб створити прецизійну цифрову адаптивну систему стабілізації доцільним є використання сучасних розробок сучасної теорії керування, застосовувати адаптивну та робастну теорії керування, а також використовувати штучні нейронні мережі.

### **1.3 Аналіз попередніх досліджень**

Для аналізу було відібрано роботи за наступними темами:

- Системи стабілізації, напрямки їх розвитку, вдосконалення цих систем.
- Цифрові регулятори.

У роботі [11] описується розробка та дослідження нового стабілізатора складних навігаційних систем покращених експлуатаційних характеристик. Описано стабілізатор СВУ-500, призначений для стабілізованого наведення у горизонтальній і вертикальній площинах виробу при стрільбі з ходу, з місця й на плаву по наземних і повітряних цілях. Описано склад, режим і принцип роботи стабілізатора. Описано, при яких факторах стабілізатор зберігає свою працездатність. З цієї роботи можна виділити основні параметри і характеристики сучасних стабілізаторів, на які можна орієнтуватися і покращувати.

Моделювання руху наземного гусеничного об'єкту пересіченою місцевістю виконується у роботі [12] для подальшого використання отриманих даних для моделювання в програмі Simulink системи стабілізації обладнання. А також розглянуто як впливає зміна характеристик зовнішніх, а також параметрів роботи гусеничних транспортних засобів на динаміку руху об'єктів стабілізації та параметри системи стабілізації. Результати, які були отримані, можуть використовуватися для подальшого вдосконалення цифрових систем стабілізації обладнання на рухомих об'єктах шляхом адаптації алгоритму керування. А також ці результати можна використовувати для порівняння з результатами системи, яка буде розроблена і описана у магістерській дисертації.

У роботі [13] подані шляхи, які дозволяють виконати лінеаризацію моделі системи стабілізації та визначення курсу, а також отримати вирази для формувальних фільтрів для задання збурень, які викликані морськими хвилями та виконати параметричну оптимізацію. Результати можна використовувати для оптимізації системи стабілізації, яка розробляється.

Новий коріолісовий гіроскоп розглянуто у роботі [14]. Для забезпечення високої точності системи стабілізації навігаційного комплексу високі вимоги висуваються до датчиків кутової швидкості. Цей гіроскоп побудований на основі недорогого металевого резонатору, має високі показники точності та надійності і здатний конкурувати з волоконо-оптичним гіроскопом. Інформація з цієї статті може використовуватись для вдосконалення матеріальної бази розробляємої системи стабілізації

В роботі [15] розглянуто сучасні методи  $H_\infty$ -синтезу робастних регуляторів для систем керування широкого класу. Представлена класифікація методів. Показано порівняння щодо доцільності їх застосування для проектування систем стабілізації.

Методику поліноміального синтезу алгоритмів цифрового керування для автоматичних слідкуючих систем викладено у роботі [16]. Більшість існуючих методів синтезу цифрових регуляторів, які реалізують принцип керування за відхиленням, будуються на принципах синтезу неперервних систем. Але їх методологія не дозволяє реалізувати підвищення точності системи в сталому режимі та забезпечення умов її стійкості одночасно. За викладеною методикою алгоритми керування синтезуються в результаті розв'язання різницевих рівнянь, які визначаються за дискретними передатними функціями цифрових регуляторів. Використання алгоритмів, які були синтезовані за запропонованою методикою, дозволяє підвищити точність замкнених систем управління в сталому режимі. Підвищення точності відбувається завдяки збільшенню порядку астатизму системи але забезпечуються умови стійкості системи. Відмінною рисою запропонованого підходу є формування вимог до якості системи в сталому та перехідному режимах на етапі синтезу цифрового регулятора.

Синтез та моделювання нейромережевого ПД-регулятора засобами LabVIEW для створення адаптивної системи автоматичного керування представлено у роботі [17]. Створення нейромережевого ПД-регулятора виконано на основі класичного ПД-регулятора. Отримані результати можуть бути використанні для створення і вдосконалення цифрового регулятора розробляємої системи стабілізації.

У роботі [18] запропоновано методику налаштування адаптивного ПД-регулятора з використанням нечіткої логіки з моделюванням в програмному забезпеченні MatLab, що дозволяє зменшити час налаштування і розширити можливості адаптивного регулятора в процесі керування.

Побудова систем автоматичного регулювання з використанням класичних, ПД і модальних регуляторів розглядається у роботі [19]. Розрахунок коефіцієнтів цих регуляторів здійснюється на основі класичних формул, виходячи з необхідних критеріїв якості перехідних процесів.

У роботі [20] показано, що похибка яка виникає внаслідок кутової швидкості обертання Землі, є суттєвою. Її потрібно обов'язково враховувати під час проектування навігаційних елементів ГС.

Нову формулу розрахунку коефіцієнтів ПnД-регуляторів запропоновано у роботі [21], які забезпечують високу якість синтезованої цифрової системи управління. А також представлені експериментальні дослідження, які підтвердили достовірність аналітичних співвідношень для визначення всіх коефіцієнтів регулятора, та продемонстрували підвищення якості скоректованої системи, отриманої використовуючи цей спосіб.

Налаштування параметрів ПnД-регулятора для створення адаптивної системи керування, які піддаються вібраційним навантаженням описується у роботі [22].

У роботі [23] представлено синтез нейромережевої системи стабілізації та наведення озброєння легкоброньованих машин. Розроблена структурна схема, яка була розроблена містить наступні компоненти: пропорційно - диференціальний регулятор положення та нейромережевий регулятор швидкості. Показано, що розроблена система має високі динамічні характеристики.

У роботі [24] розглядаються питання, які пов'язані з розробкою систем автоматичної стабілізації і також системи стабілізації в вертикальному положенні об'єкта, наведені основні етапи розробки системи, розглядаються питання, пов'язані з фільтрацією сигналу.

Особливості застосування MEMS-датчиків при розробці системи автоматичної стабілізації двоколісного робота розглядаються у роботі [25]. А також розглянуті переваги і недоліки різних типів датчиків (акселерометра і гіроскопа) при вирішенні задачі оцінки кута відхилення від вертикалі.

У роботі [26] запропоновано спосіб реалізації адаптивної системи автоматичного регулювання, заснований на використанні підлаштованого псевдолінійного двоканального коригуючого пристрою для динамічних характеристик систем автоматичного регулювання. Даний спосіб характеризується тим, що в процесі роботи системи параметри регулятора не змінюються і відповідають налаштуванням. В процесі роботи системи регулювання, в залежності від зміни параметрів об'єкта керування, змінюється коефіцієнт передачі коригуючого пристрою або створюваний фазовий зсув.

Методи вимірювання висоти мікропрофілю дорожньої поверхні та методи синтезу мікропрофілю дороги для математичного моделювання розглянуто у роботі [27].

У роботі [28] розглядається метод налаштування автоматичних систем керування із цифровим регулятором на заданий показник коливальності. Цей метод дозволяє використовувати в якості критерію налаштування цифрової системи керування показник коливальності з урахуванням часу квантування цифрового регулятора. Такий підхід надає

змогу розглядати час квантування як додатковий параметр для налаштування цифрової системи керування.

Спосіб розрахунку перехідних процесів у неперервній системі керування за імпульсною характеристикою об'єкта розглядається у статті [29]. Цей метод дозволяє використовувати в якості динамічної властивості об'єкта керування його імпульсну характеристику. Такий підхід дає можливість ігнорувати етап апроксимації при розрахунках системи керування, і як наслідок дозволяє зменшити похибку моделювання.

Як видно з огляду сучасної періодичної літератури, розробка системи стабілізації обладнання з цифровим регулятором є актуальною. Багато досліджень і вдосконалень проводиться у галузях: систем стабілізації різноманітного обладнання; цифрових регуляторів, а саме використання нечіткої логіки, нейромереж, вдосконалення класичних регуляторів; визначення мікропрофілю доріг, які можуть допомогти при моделюванні створених математичних моделей систем стабілізації.

А також існує багато питань, які ще не вирішені. Одним із них є питання адаптивності системи стабілізації під різноманітні характеристики стабілізуючого обладнання, а також під показники профілю нерівностей поверхні по якій рухаються об'єкти на яких встановлено обладнання. Актуальними залишаються питання підвищення точності та швидкодії.

#### **1.4 Мета і завдання дослідження**

Мета: забезпечення характеристик точності та швидкодії ССН при русі об'єкта по місцевості з різним профілем поверхні.

Завдання:

1. Огляд стану та шляхів вдосконалення систем стабілізації;
2. Аналіз системи стабілізації з неперервним регулятором;
3. Аналітичне конструювання та дослідження характеристик цифрового регулятора;
4. Дослідження та порівняння характеристик ССН при випадкових впливах.

Об'єкт: процес стабілізації обладнання на рухомих об'єктах.

Предмет: методи та засоби підвищення точності і швидкодії системи стабілізації.

## РОЗДІЛ 2

### АНАЛІЗ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ З НЕПЕРЕРВНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

#### 2.1 Опис та структурна схема системи стабілізації

Сучасні системи стабілізації зазвичай є системами автоматичного керування, які містять такі елементи: регулятори (пропорційно-інтегральний регулятор), корегуючі пристрої, перетворювачі інформації, виконавчі двигуни, редуктори [30]. Система є аналоговою, з принципом керування по відхиленню. Виконавчий двигун (ЕДМ-20 малоінерційний електродвигун постійного струму призначений для роботи в системах автоматики) в загальному випадку описується моделлю ланки другого порядку (з урахуванням електромагнітної сталої часу  $T_{ar}$ ).

На рис. 2.1. представлена структурна схема системи стабілізації.

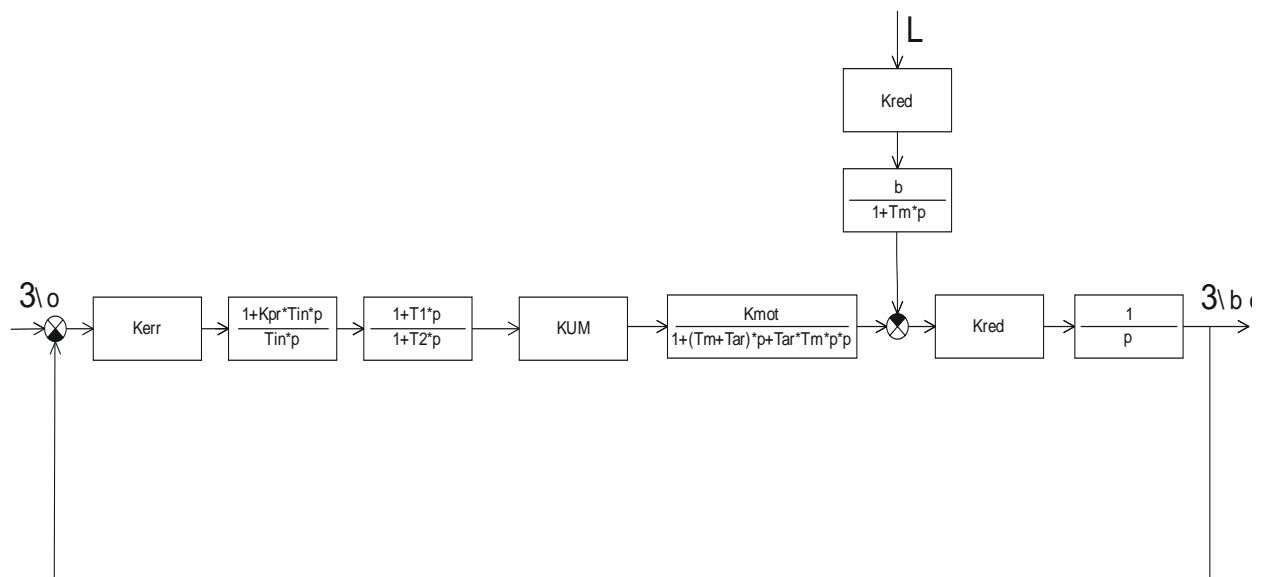


Рис. 2.1. Структурна схема системи стабілізації

Для наведеної на рис. 2.1 структурної схеми отримано передатну функцію розімкненою системи, за допомогою якої можна перевірити стійкість, а також побудувати частотні характеристики.

Передатна функція розімкненої системи визначається за виразом:

$$W_{роз}(p) = \frac{K_{ker} \cdot K_{mot} \cdot K_{red} \cdot KUM \cdot (1 + K_{pr} T_{in} p)(1 + T_1 p)}{p^2 (1 + T_2 p)(1 + T_m p)(1 + T_{ar} p)}, \quad (2.1)$$

де  $K_{ker}$  - коефіцієнт підсилення коригуючого пристрою;  $K_{red}$  - коефіцієнт підсилення редуктора;  $KUM$  - коефіцієнт підсилення потужності;  $K_{pr}$  - коефіцієнт підсилення ізодромної

ланки,  $T_{in}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$  - сталі часу аналогового регулятора;  $K_{mot}$  - коефіцієнт підсилення виконавчого двигуна,  $T_m$  - механічна стала часу виконавчого двигуна,  $T_{ar}$  - електромагнітна стала часу виконавчого двигуна.

### 2.1.1 Аналіз елементної бази

В якості виконавчого двигуна використовується ЕДМ-20 [31]. Це малоінерційний реверсивний електродвигун постійного струму з постійними магнітами і гладким якорем має високі точностні характеристики, відрізняється високою швидкістю, малою напругою зрушення, низьким моментом інерції. Призначення - обертання башти і блоку озброєння в горизонтальній і вертикальній площинах, використання в регульованих силових електроприводах, а також для роботи в системах автоматики. Зовнішній вигляд наведено на рис. 2.2.



Рис.2.2. Електродвигун ЕДМ-20

Характеристики електродвигуна ЕДМ-20:

- Власна електромеханічна постійна часу: 7.7 мс;
- Електромагнітна постійна часу  $T_{ar}$  : 2.8 мс;
- Номінальна кутова швидкість (при 27В)  $\omega_{nom}$  : 3000 об/хв;
- Кутова швидкість холостого ходу: 3800 об/хв;
- Номінальний крутний момент (при 27В)  $M_{nom}$  : 1.3 нм;
- Власний момент інерції якоря:  $2,8 \cdot 10^{-4}$  кг\*м<sup>2</sup>;
- Опір якоря  $R_{ja}$  : 0,11 Ом
- Номінальна напруга  $U_{nom}$  : 27 В;
- Номінальна потужність: 400 Вт;



- Максимальний споживаний струм  $I_{nom}$ : 25 А;
- Коефіцієнт корисної дії: 65%;
- Габарити: 190 x 300 [мм];
- Вага: 14 кг

Для виконавчого двигуна розраховано електромеханічну сталу часу  $T_m$ , з врахуванням моменту інерції редуктора та зовнішнього впливу, яка у подальшому буде використовуватися для досліджень:

Коефіцієнт проти-ЕРС:

$$C_e = \frac{U_{nom} - I_{nom} \cdot R_{ja}}{\omega_{nom}} = \frac{27 - 25 \cdot 0,11}{314} = 0,077 \left[ \frac{B \cdot c}{рад} \right];$$

Коефіцієнт моменту (конструктивний):

$$C_m = \frac{M_{nom}}{I_{nom}} = \frac{1,3}{25} = 0,052 \left[ \frac{H \cdot м}{А} \right];$$

$$\beta = \frac{R_{ja}}{C_e \cdot C_m} = \frac{0,11}{0,077 \cdot 0,052} = 27,5 \left[ \frac{рад}{H \cdot м \cdot c} \right];$$

Момент інерції впливу:

$$J_{load} = J_{load\_const} + J_{load\_var1} + J_{load\_var2};$$

$$J_{load\_const} = 570 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{load\_var1\_min} = 50 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ (Кут нахилу зброї 60 градусів та віддача);}$$

$$J_{load\_var1\_max} = 250 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ (Кут нахилу зброї 0 градусів);}$$

$$J_{load\_var2\_min} = 0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ (Мінімум амуніції);}$$

$$J_{load\_var2\_max} = 100 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ (Повна амуніція: ракети та снаряди);}$$

$$J_{load\_min} = 570 + 50 + 0 = 620 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{load\_max} = 570 + 250 + 100 = 920 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{averag} = 770 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

Сумарний момент інерції системи:

$$J_{sm} = J_{load} / i^2 + J_{mot} + J_{red} = J_{load} / i^2 + 1,5 \cdot J_{mot};$$

$$J_{sm\_min} = J_{load\_min} / i^2 + 1,5 \cdot J_{mot} = 620 / 373^2 + 1,5 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_{sm\_max} = J_{load\_max} / i^2 + 1,5 \cdot J_{mot} = 920 / 373^2 + 1,5 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$T_{m\_min} = J_{sm\_min} \cdot \beta = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 27,5 = 0,14 \text{ с};$$

$$T_{m\_max} = J_{sm\_max} \cdot \beta = 7,2 \cdot 10^{-3} \cdot 27,5 = 0,20 \text{ с};$$

Для дослідження обрано значення  $T_m = 0,17c$ .

### 2.1.2 Аналіз стійкості

Для перевірки стійкості системи було проведено аналіз за допомогою критерія Гурвіца, а також за допомогою прямого методу визначення коренів характеристичного поліному.

За допомогою програмного забезпечення MatLab було створено програму для перевірки стійкості. Код програми наведено у Додатку А (п. 1).

Були визначені коефіцієнти характеристичного рівняння:

$$a_{25} = 2e-07;$$

$$a_{24} = 0.000302;$$

$$a_{23} = 0.103;$$

$$a_{22} = 7.6578;$$

$$a_{21} = 199.73;$$

$$a_{20} = 1331.6;$$

Всі коефіцієнти більше 0, це означає, що виконується необхідна умова критерія Гурвіца: всі коефіцієнти повинні бути додатними.

Розраховано визначники матриці Гурвіца, яка складається з коефіцієнтів характеристичного рівняння:

$$\Delta_{25} = 50.029;$$

$$\Delta_{24} = 0.037572;$$

$$\Delta_{23} = 0.00020834;$$

$$\Delta_{22} = 2.9574e-05;$$

$$\Delta_{21} = 0.000302;$$

Визначники є додатними, це означає що виконується достатня умова критерія Гурвіца. Так як виконується необхідна і достатня умова критерія Гурвіца, це означає що система є стійкою.

За допомогою прямого методу визначимо корені характеристичного поліному:

$$k_{orni} =$$

$$-1055.7$$

$$-364.12$$

$$-40.102 + 11.13i$$

$$-40.102 - 11.13i$$

$$-10$$

Отримані корені є від'ємними, а це означає що система є стійкою.

Проаналізувавши отримані результати можна зробити висновок що система автоматичного керування є стійкою, це підтверджено виконанням достатньої і необхідної умови критерію Гурвіца, а також коренями характеристичних рівнянь які менше нуля.

## 2.2 Побудова логарифмічних частотних характеристик

За допомогою програмного забезпечення MatLab було побудовано логарифмічні частотні характеристики системи: логарифмічна амплітудно-частотна характеристика та логарифмічна фазо-частотна характеристика. Код програми для побудови логарифмічних частотних характеристик наведено у Додатку А (п.2).

На рис. 2.3. Представлені логарифмічні частотні характеристики системи стабілізації.

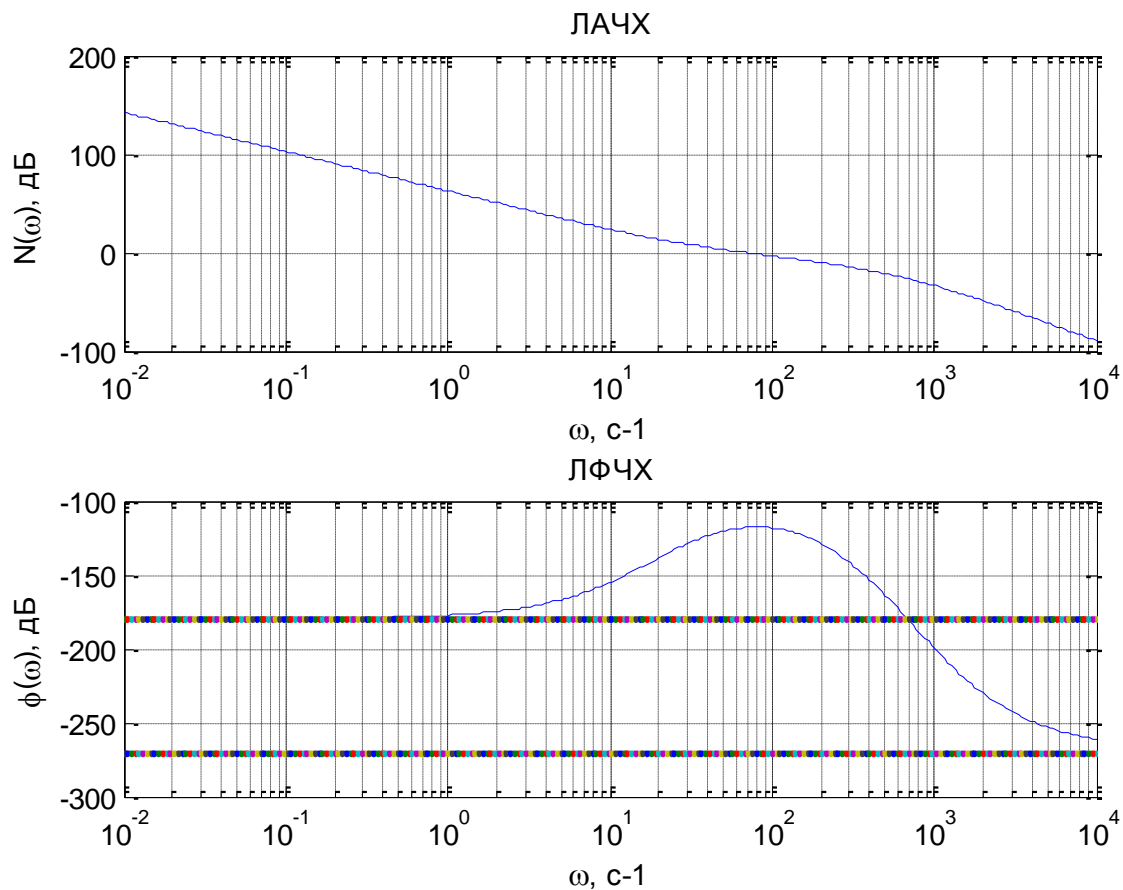


Рис. 2.3. Логарифмічні частотні характеристики системи стабілізації

З рис. 2.3 визначено, що частота зрізу дорівнює  $68,6\text{с}^{-1}$ , а запас стійкості по фазі дорівнює  $62^\circ$ , що є прийнятними показниками.

### 2.3 Дослідження часових характеристик

За допомогою програмного забезпечення MatLab було побудовано часові характеристики системи:

- перехідна - реакція системи на функцію Хевісайда;
- імпульсна характеристики – реакція системи на функцію Дірака.

Код програми для побудови часових характеристик наведено у Додатку А (п.3).

На рис. 2.4 зображено модель системи для отримання перехідної характеристики

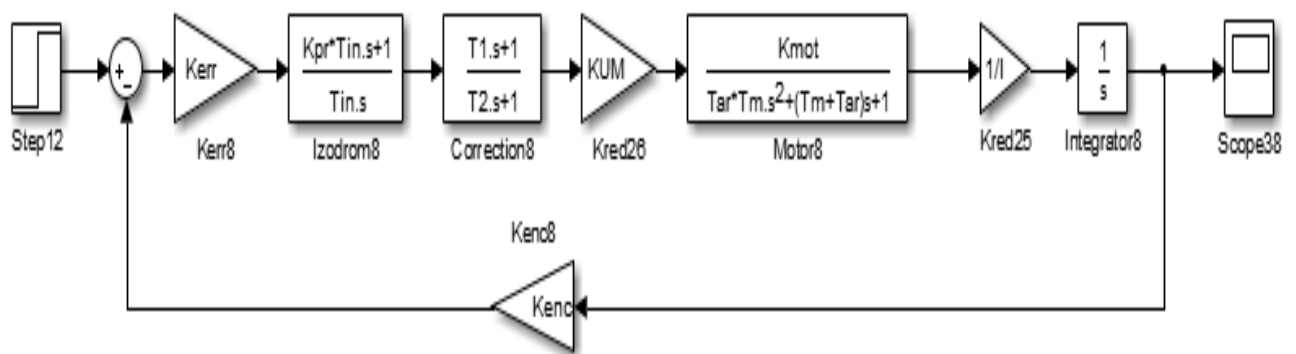


Рис. 2.4. Модель системи для отримання перехідної характеристики

На рис. 2.5 зображено модель системи для отримання імпульсної характеристики

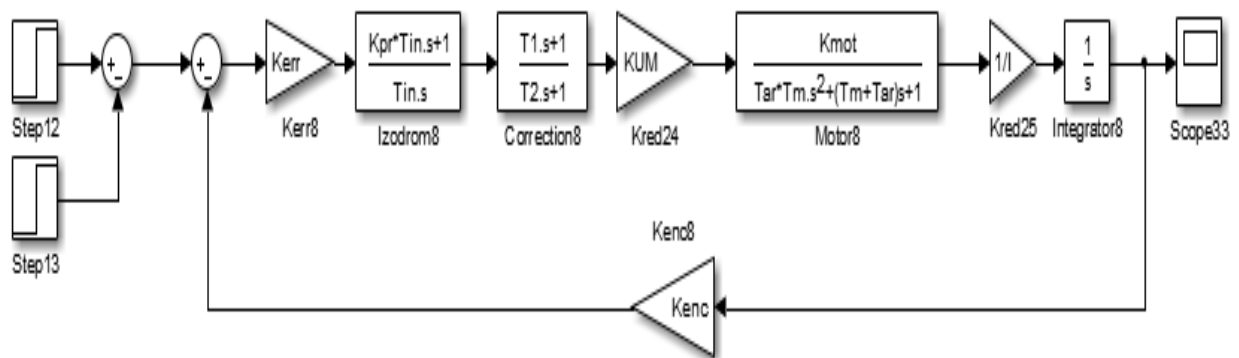


Рис. 2.5. Модель системи для отримання імпульсної характеристики

На рис. 2.6 та рис. 2.7 представлені перехідна та імпульсна характеристики.

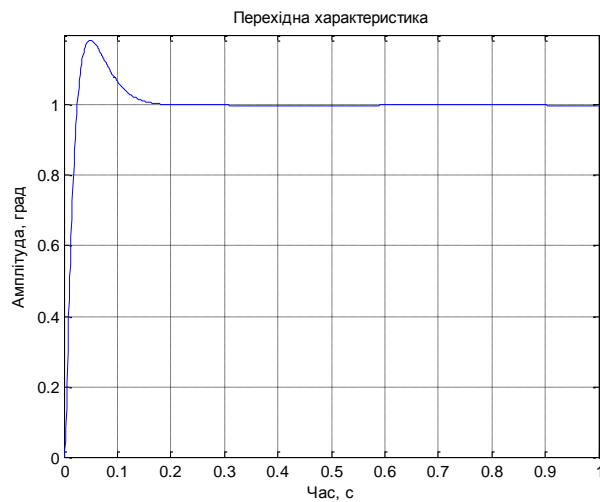


Рис. 2.6. Перехідна характеристика

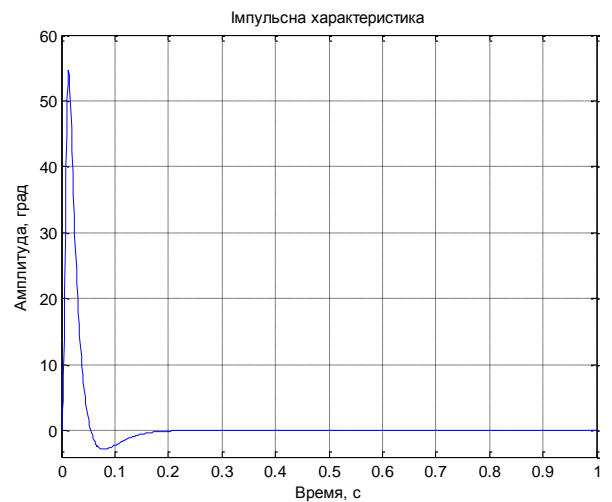


Рис. 2.7. Імпульсна характеристика

Як видно з рис. 2.6 та рис. 2.7 час закінчення перехідного процесу системи дорівнює  $t_p = 0,2$ , а перерегулювання складає менше 20%, що є прийнятним результатом.

#### 2.4 Моделювання та оцінка точності системи стабілізації при типових впливах.

Було досліджено сталий вплив на систему стабілізації, який було задано у вигляді  $L = \text{const} = M_0 = 620$ .

Модель системи у Simulink для цього типу збурення наведено на рис. 2.8. Код програми для побудови графіків для усіх типів впливів наведено у Додатку А (п.4).

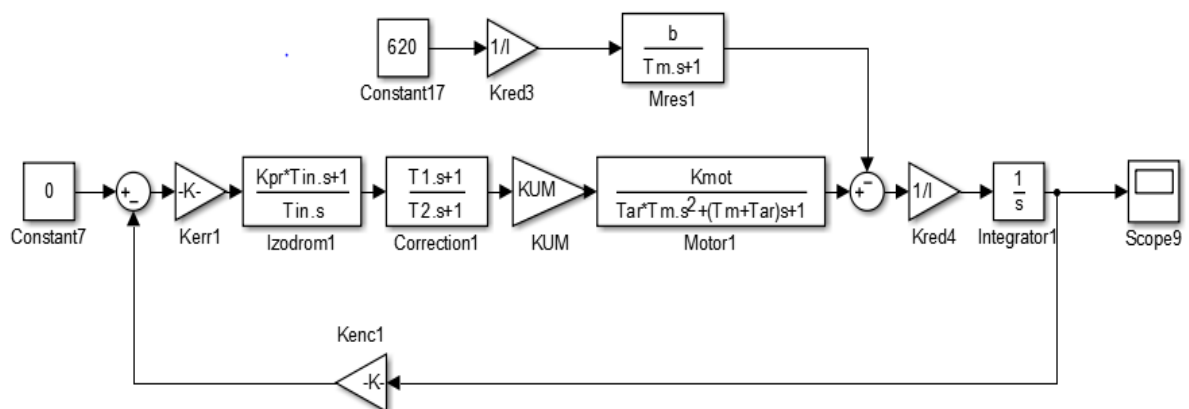


Рис. 2.8. Модель системи у Simulink для дослідження сталого впливу

Отриманий результат моделювання наведено на рис. 2.9.

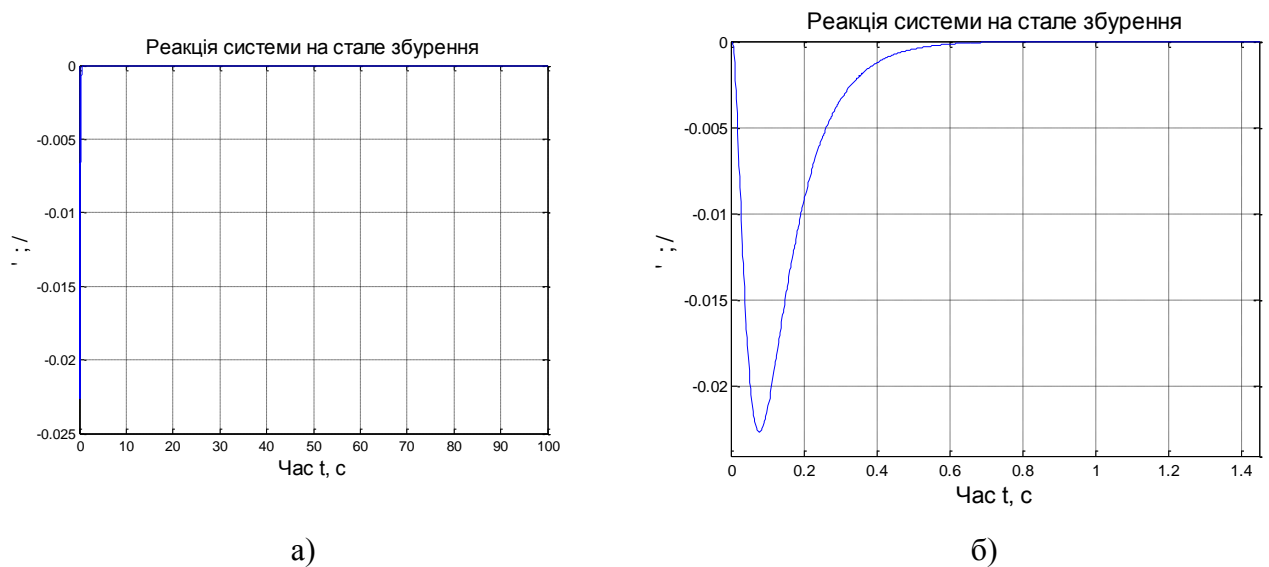


Рис. 2.9. Реакція системи на стале збурення: а) загальний вигляд; б) збільшений масштаб

При аналізі отриманих результатів (рис. 2.9), встановлено, що максимальне відхилення дорівнює приблизно  $0,02^\circ$ , але з часом система повертається в своє початкове нульове положення. Час встановлення нульового вихідного сигналу  $t = 1c$ .

Досліджено швидкісний вплив на систему стабілізації, який було задано у вигляді  $L = M_0 + m_1 t; m_1 = 0,5; m_2 = 2$ .

Модель системи у Simulink для такого збурення наведено на рис. 2.10.

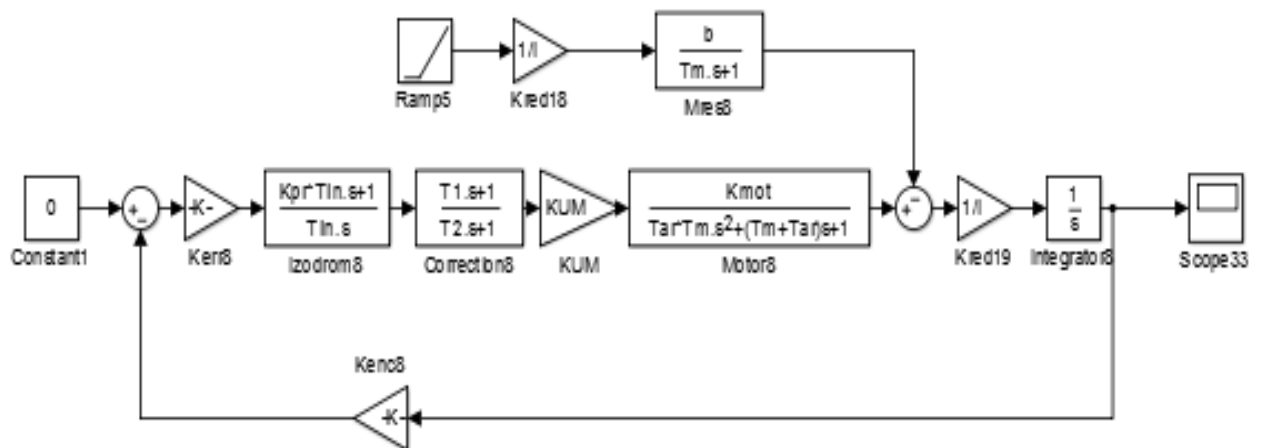


Рис. 2.10. Модель системи у Simulink для дослідження швидкісного впливу

Отриманий результат моделювання при  $m_1 = 0,5$  наведено на рис. 2.10.

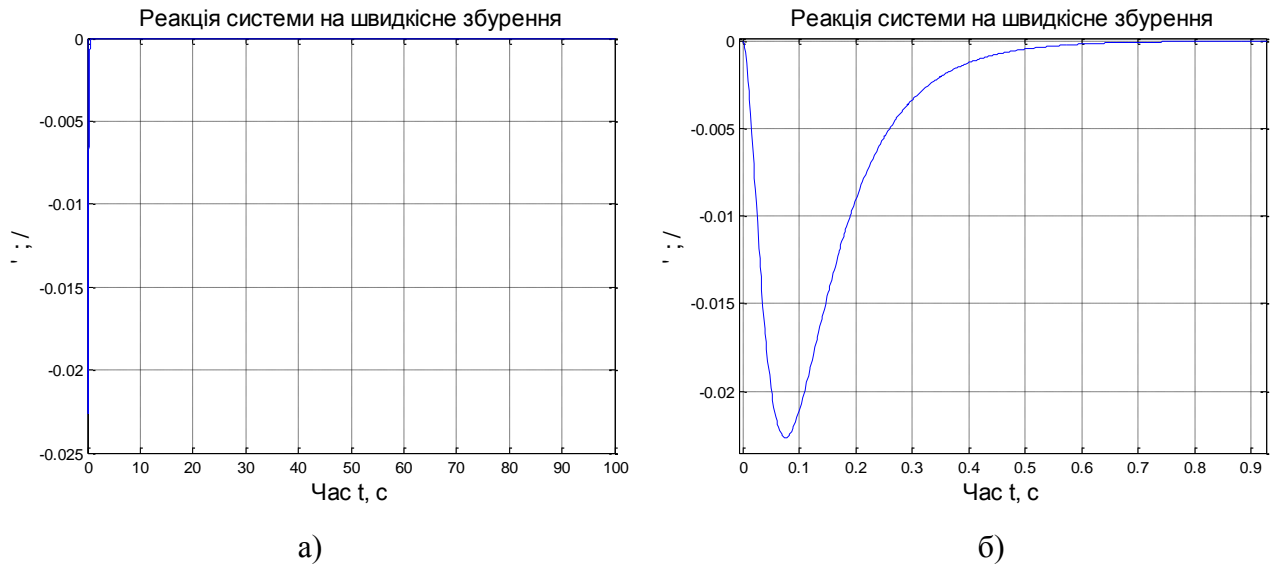


Рис. 2.10. Реакція системи на швидкісне збурення: а) загальний вигляд; б) збільшений масштаб

При аналізі отриманих результатів (рис. 2.10), було встановлено, що максимальне відхилення дорівнює приблизно  $0,022^\circ$ , але з часом система повертається в своє початкове положення з похибкою  $\delta_L = 4 \cdot 10^{-6}$ . Час встановлення у початкове положення  $t = 0,7c$ .

Отриманий результат моделювання при  $m_1 = 2$  наведено на рис. 2.11.

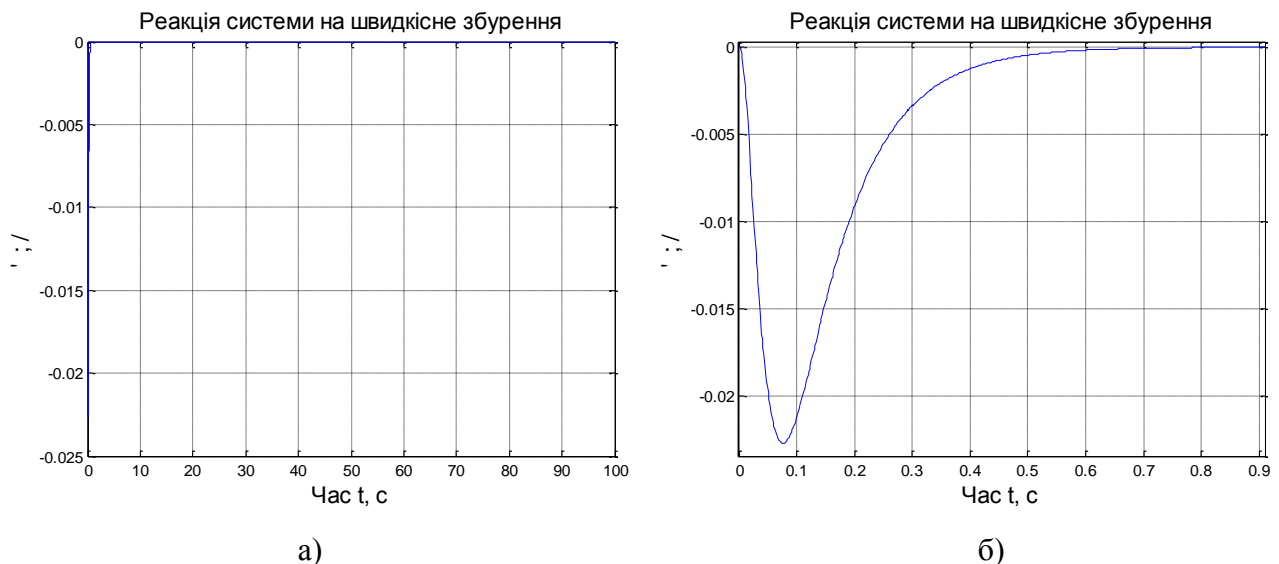


Рис. 2.11. Реакція системи на швидкісне збурення: а) загальний вигляд; б) збільшений масштаб

При аналізі отриманих результатів (рис. 2.11), встановлено, що максимальне відхилення дорівнює приблизно  $0,022^\circ$ , але з часом система повертається в своє початкове положення з похибкою  $\delta_L = 1,2 \cdot 10^{-5}$ . Але якщо порівняти з результатами коли  $m_1 = 0.5$  то

похибка встановлення в початкове положення, як можна побачити з рис. 2.10 та рис. 2.11 буде більшою.

Досліджено динамічний вплив на систему стабілізації, який задано у вигляді  $L = M_0 + m_2 t^2; m_2 = 0.5; m_2 = 1$ .

Модель системи у Simulink для такого збурення наведено на рис. 2.12.

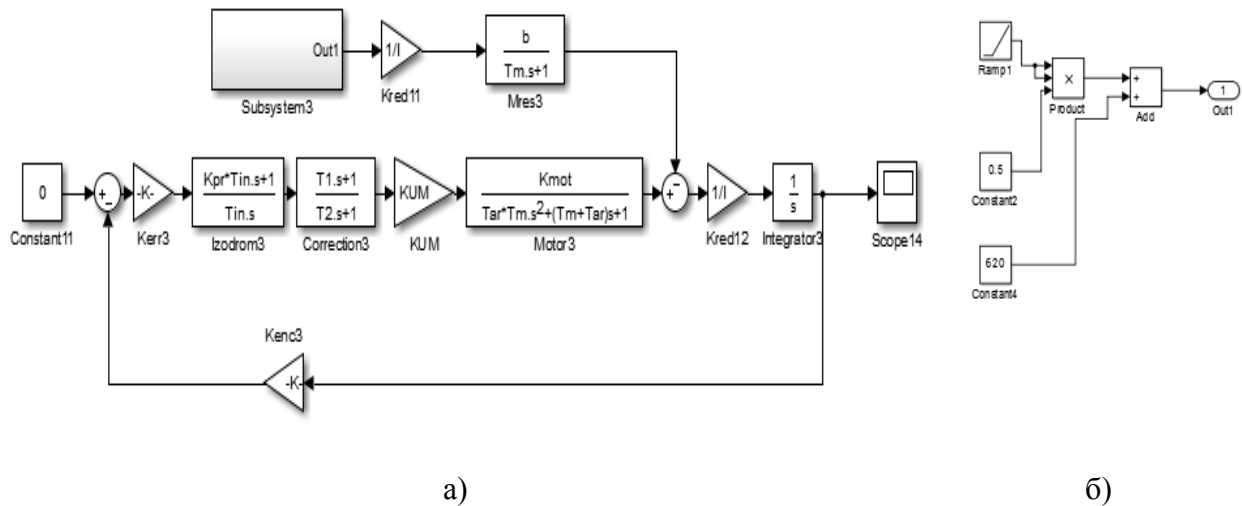


Рис. 2.12. Модель системи у Simulink для дослідження динамічного впливу: а) загальний вигляд; б) Підсистема «Subsystem 3», яка описує динамічний вплив

Отриманий результат моделювання при  $m_2 = 0.5$  наведено на рис. 2.13.

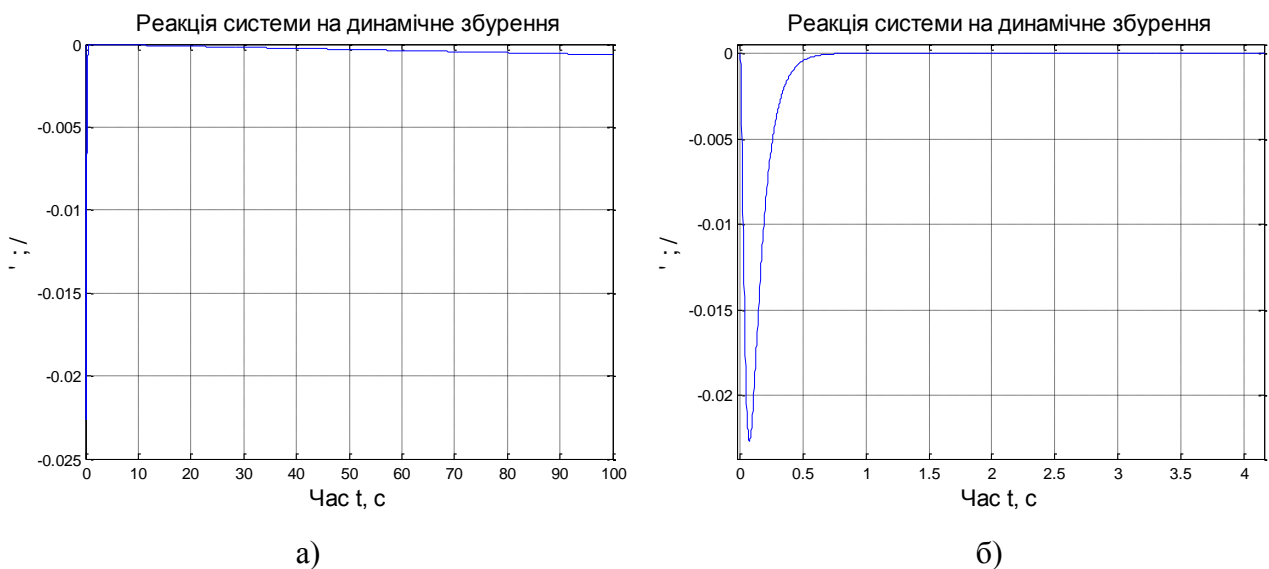


Рис. 2.13. Реакція системи на динамічне збурення: а) загальний вигляд; б) збільшений масштаб



При аналізі отриманих результатів (рис. 2.13), визначено, що похибка буде накопичуватися з часом і прагнути до нескінченності (рис. 2.13,а).

Отриманий результат моделювання при  $m_2 = 1$  наведено на рис. 2.14.

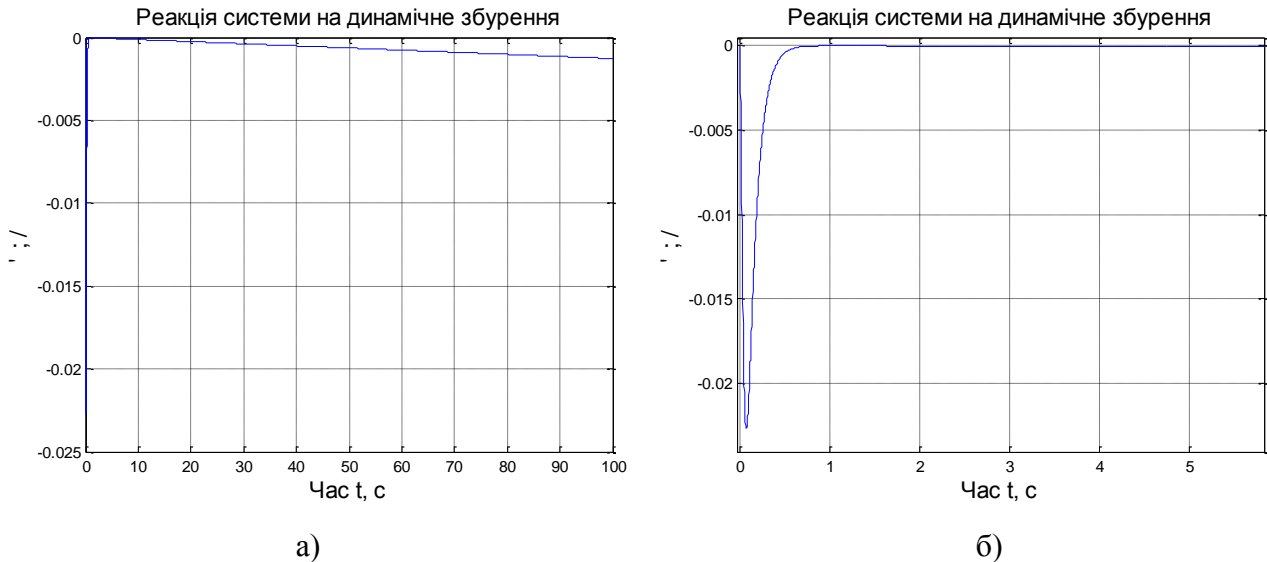


Рис. 2.14. Реакція системи на динамічне збурення: а) загальний вигляд; б) збільшений масштаб

При аналізі отриманих результатів рис. 2.14, якщо порівняти з результатами коли  $m_1 = 1$ , то похибка накопичується швидше, як можна побачити з рис. 2.13,а та рис. 2.14,а.

Досліджено гармонічний вплив на систему стабілізації, який було задано у вигляді  $L = \sum A_i \cos(2\pi f_i t)$ ;  $A_1 = 5$ ,  $f_1 = 2\text{Гц}$ ;  $A_2 = 0,5$ ,  $f_2 = 30\text{Гц}$ ;  $A_3 = 0,1$ ,  $f_3 = 100\text{Гц}$ .

Модель системи у Simulink для такого збурення наведено на рис. 2.15.

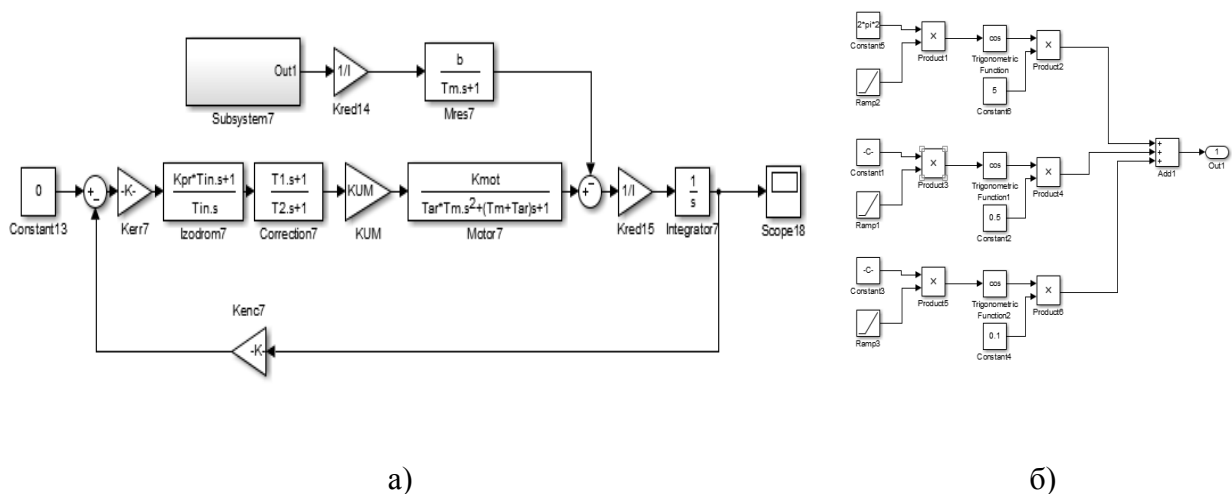


Рис. 2.15. Модель системи у Simulink для дослідження гармонічного впливу: а) загальний вигляд; б) Підсистема «Subsystem 7», яка описує гармонічний вплив

Отриманий результат моделювання наведено на рис. 2.16.

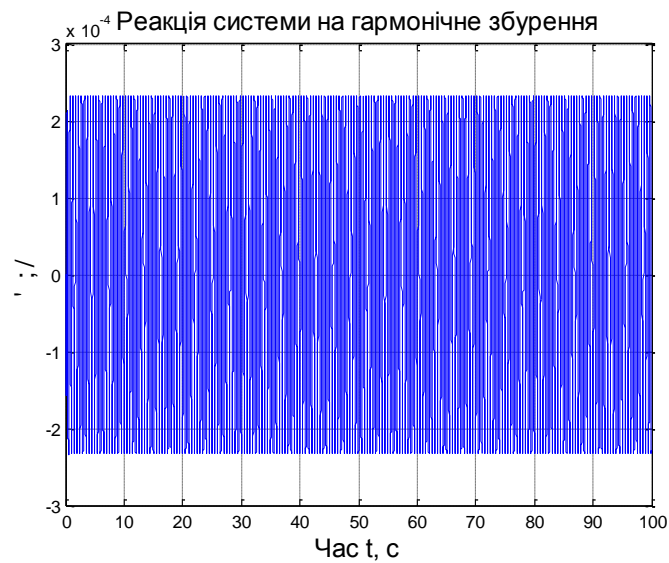


Рис. 2.16. Реакція системи на гармонічне збурення

При аналізі отриманих результатів (рис. 2.16), було визначено, що максимальні відхилення приблизно дорівнюють  $2,5 \cdot 10^{-4}$ .

Проведено дослідження реакції системи стабілізації на прикладене випадкове збурення типу «білий шум», яке було задане за допомогою блока «Band-Limited White Noise» у середовищі Simulink. Модель системи у Simulink для такого збурення наведено на рис. 2.17.

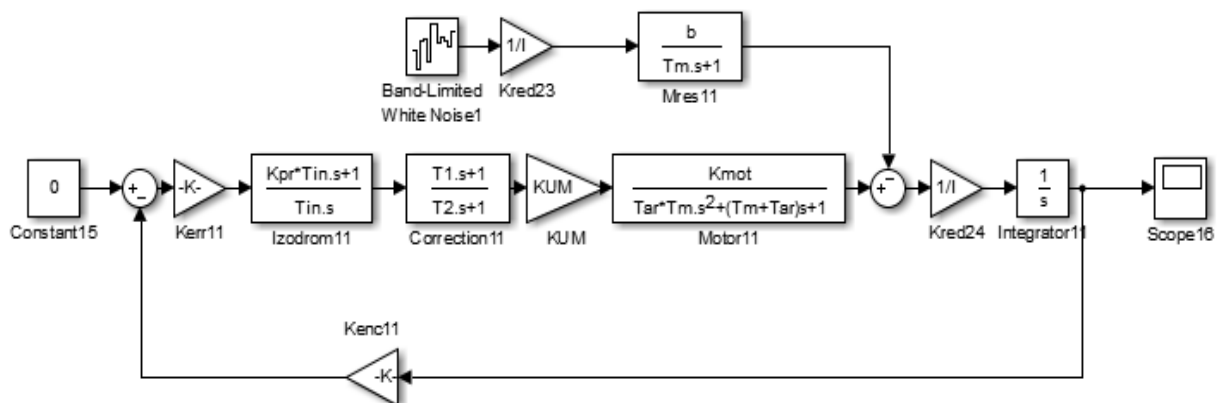


Рис. 2.17. Модель системи у Simulink для впливу типу «білий шум»

Отриманий результат моделювання наведено на рис. 2.18

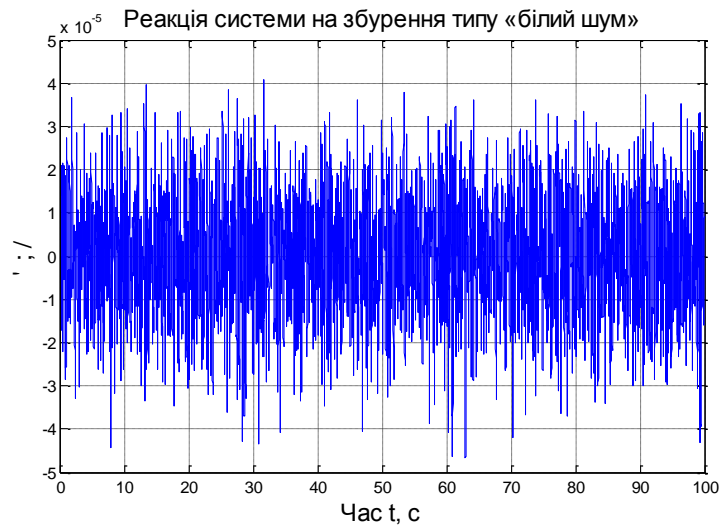


Рис. 2.18. Реакція системи на збурення типу «білий шум»

При аналізі отриманих результатів (рис. 2.18), визначено, що максимальне відхилення приблизно дорівнює  $4 \cdot 10^{-5}^\circ$ .

Після моделювання типових впливів можна зробити висновок що дана система може використовуватися, вона має невеликі значення похибок які лежать в діапазоні  $[4 \cdot 10^{-5}^\circ \dots 0.022^\circ]$ , крім прискореного впливу коли похибка прямує до нескінченості.

### Висновки до розділу 2

Проведено аналіз елементної бази і обрано виконавчий двигун системи стабілізації.

Проведено аналіз стійкості, за яким встановлено, що досліджувана система є стійкою.

За структурною схемою було побудовано логарифмічну амплітудно-частотну та логарифмічну фазо-частотну характеристики і визначено, що частота зрізу дорівнює  $68,6 \text{ c}^{-1}$ , а запас стійкості по фазі дорівнює  $62^\circ$  і це є прийнятним результатом. А також часові характеристики (перехідну та імпульсну), за якими було отримано час закінчення перехідного процесу, який дорівнює  $t_p = 0,2 \text{ c}$ , а перерегулювання складає менше 20%, що є прийнятним результатом.

Після моделювання типових впливів можна зробити висновок, що дана система може використовуватися, вона має невеликі значення похибок які лежать в діапазоні  $[4 \cdot 10^{-5}^\circ \dots 0.022^\circ]$ . При сталому, швидкісному, гармонічному впливі та впливі типу «білий шум» існує невелике відхилення, а при динамічному впливі похибка прямує до нескінченості.

### РОЗДІЛ 3

#### АНАЛІТИЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА

ПД-регулятор - найпоширеніший з усіх регуляторів [32]. Він будується за допомогою типових ланок, і це пояснює його широке застосування у багатьох сферах.

Пропорційна ланка створює сигнал, який протидіє відхиленню регульованої величини в даний момент часу.

Інтегруюча ланка накопичує результуюче значення, нівелюючи, таким чином, недолік пропорційної ланки, який полягає у наявності статичної помилки.

Диференціююча ланка прогнозує відхилення від заданої величини і стежить за швидкістю відхилення.

У випадку якщо на вхід регулятора знаходиться сигнал та завада, мають місце суттєві стрибки регульованої величини або процес має стохастичний характер - диференціююча складова призводить систему до розбіжності процесу.

У магістерській дисертації буде використовуватись ПД-регулятор, основні параметри якого будуть розраховані на основі параметрів попереднього регулятора, який наведений у розділі 2.

#### 3.1 Аналітичний розрахунок коефіцієнтів аналогового регулятора

Для того щоб розрахувати коефіцієнти регулятора, у даному випадку буде розглядатись ПД-регулятор, потрібно записати його передатну функцію у загальному вигляді. Структурна схема ПД-регулятора наведена на рис. 3.1.

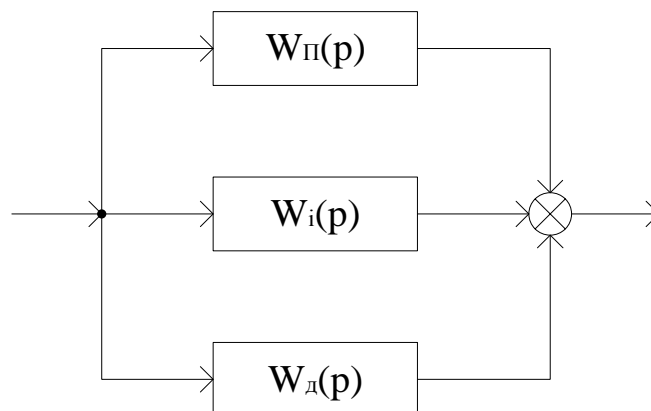


Рис. 3.1. Структурна схема ПД-регулятора

Розрахуємо передатну функцію ПІД-регулятора, яка являє собою паралельне з'єднання пропорційної, інтегруючої та диференціюючої ланок [33]. Передатна функція пропорційної ланки дорівнює:

$$W_n(p) = K_n \quad (3.1)$$

Передатна функція інтегруючої ланки дорівнює:

$$W_i(p) = \frac{K_i}{p} \quad (3.2)$$

Передатна функція диференціюючої ланки дорівнює:

$$W_o(p) = \frac{K_o \cdot p}{T_2 p + 1} \quad (3.3)$$

Загальна передатна функція дорівнює сумі усіх передатних функцій (3.1) – (3.3), за правилами визначення передатної функції паралельно з'єднаних ланок:

$$W_{\text{нід}}(p) = K_n + \frac{K_i}{p} + \frac{K_o \cdot p}{T_2 p + 1} \quad (3.4)$$

Приведемо (3.4) до спільного знаменнику:

$$\begin{aligned} W_{\text{нід}}(p) &= K_n + \frac{K_i}{p} + \frac{K_o \cdot p}{T_2 p + 1} = \frac{K_n p(T_2 p + 1) + K_i(T_2 p + 1) + K_o p^2}{p(T_2 p + 1)} = \\ &= \frac{K_n T_2 p^2 + K_i p + K_i T_2 p + K_i + K_o p^2}{p(T_2 p + 1)} = \frac{(K_n T_2 + K_o) p^2 + (K_n + K_i T_2) p + K_i}{p(T_2 p + 1)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Розрахуємо коефіцієнти  $K_n, K_i, K_o$ , які будуть робити ПІД-регулятор відповідним попередньому регулятору який використовувався у розділі 2.

Запишемо передатну функцію попереднього регулятора структурну схему якого наведено на рис. 3.2.



Рис. 3.2. Структурна схема попереднього неперервного регулятора

Регулятор складається з двох ланок які описуються передатними функціями  $W_1(p)$  і  $W_2(p)$ .

$$W_1(p) = \frac{1 + Kpr \cdot T_{in} \cdot p}{T_{in} \cdot p} \quad (3.6)$$

$$W_2(p) = \frac{1 + T_1 \cdot p}{1 + T_2 \cdot p} \quad (3.7)$$

Загальна передатна функція дорівнює добутку передатних функцій (3.6) – (3.7), тому що вони з'єднані послідовно.

$$W_{pez}(p) = \frac{1 + Kpr \cdot Tin \cdot p}{Tin \cdot p} \cdot \frac{1 + T_1 \cdot p}{1 + T_2 \cdot p} \quad (3.8)$$

Нехай  $K^* = \frac{1}{Tin}$ , тоді

$$\begin{aligned} W_{pez}(p) &= \frac{K^* (1 + Kpr \cdot Tin \cdot p)(1 + T_1 \cdot p)}{p(1 + T_2 \cdot p)} = \frac{K^* (1 + Kpr \cdot T_1 \cdot Tin \cdot p^2 + T_1 \cdot p + Kpr \cdot Tin \cdot p)}{p(1 + T_2 \cdot p)} = \\ &= \frac{K^* + K^* \cdot Kpr \cdot T_1 \cdot Tin \cdot p^2 + K^* \cdot T_1 \cdot p + K^* \cdot Kpr \cdot Tin \cdot p}{p(1 + T_2 \cdot p)} = \\ &= \frac{K^* \cdot Kpr \cdot T_1 \cdot Tin \cdot p^2 + (K^* \cdot T_1 + K^* \cdot Kpr \cdot Tin)p + K^*}{p(1 + T_2 \cdot p)} = \\ &= \frac{Kpr \cdot T_1 \cdot p^2 + (\frac{T_1}{Tin} + Kpr)p + \frac{1}{Tin}}{p(1 + T_2 \cdot p)} \end{aligned}$$

Остаточна передатна функція дорівнює:

$$W_{pez}(p) = \frac{K^* (1 + Kpr \cdot Tin \cdot p)(1 + T_1 \cdot p)}{p(1 + T_2 \cdot p)} = \frac{Kpr \cdot T_1 \cdot p^2 + (\frac{T_1}{Tin} + Kpr)p + K^*}{p(1 + T_2 \cdot p)} \quad (3.9)$$

Тепер прирівняємо передатну функцію ПД-регулятора (3.5) до передатної функції попереднього регулятора (3.9). Як видно з (3.5) та (3.9), передатні функції мають однакові знаменники, а значить це дає змогу прирівняти значення при однакових ступенях параметра  $p$  у чисельнику.

$$\begin{aligned} p^2 : K_n T_2 + K_o &= Kpr \cdot T_1 \\ p^1 : K_n + K_i T_2 &= \frac{T_1}{Tin} + Kpr \\ p^0 : K_i &= \frac{1}{Tin} \end{aligned} \quad (3.10)$$

З виразів (3.10) інтегруючий коефіцієнт ПД-регулятора дорівнює:.

$$K_i = \frac{1}{Tin} = \frac{1}{0.01} = 100 \quad (3.11)$$

Пропорційний коефіцієнт дорівнює:

$$K_n = \frac{T_1 - T_2}{Tin} + Kpr = \frac{0.05 - 0.001}{0.01} + 10 = 10 + 4.9 = 14.9 \quad (3.12)$$

Диференціюючий коефіцієнт дорівнює:

$$\begin{aligned}
K_o &= K_{pr} \cdot T_1 - K_n T_2 = K_{pr} \cdot T_1 - T_2 \left( \frac{T_1 - T_2}{T_{in}} + K_{pr} \right) = \\
&= K_{pr} \cdot (T_1 - T_2) - \frac{T_2 (T_1 - T_2)}{T_{in}} = (T_1 - T_2) \left( K_{pr} - \frac{T_2}{T_{in}} \right) = \\
&= (0.05 - 0.001) \left( 10 - \frac{0.001}{0.01} \right) = 9.9 \cdot 0.049 = 0.4851
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Розраховані коефіцієнти (3.11) – (3.13) надалі будуть використанні у моделюванні ПД-регулятора, та оцінювання його можливості використання у розробці системи стабілізації обладнання, для покращення її характеристик. Але треба враховувати, що коефіцієнти, які розраховані аналітично не завжди є оптимальними. Тому що вони не враховують багатьох похибок, наприклад, похибок інтегрування. Для отримання більш коректних параметрів необхідно проводити моделювання отриманого регулятора за допомогою комп'ютерних програм.

### 3.2 Перетворення аналогового регулятора на цифровий регулятор

Автоматизація технологічних процесів, а також підвищення ефективності систем керування шляхом використання автоматичних систем управління (САУ) є на сьогодні дуже актуальною. Сучасні САУ будуються за принципом управління за відхиленням, а також використовуються корегувальні пристрої, як пристрій управління. За допомогою використання цифрових регуляторів можна досягти високих показників якості управління. Постійно удосконалюються алгоритми цифрового регулятора, як наслідок постійного підвищення вимог до точності САУ. На сьогодні існує декілька шляхів синтезу цифрових регуляторів [16].

Один із методів полягає у перебудові аналогового коригуючого пристрою, який синтезується одним із відомих методів. Один із методів це метод логарифмічних частотних характеристик. Другий шлях - це коли в аналоговій системі починає використовуватись цифровий ПД-регулятор. Структура і характеристики регулятора визначаються завданнями, які висуваються до системи стабілізації і бажаними результатами. Але цей шлях не завжди забезпечує стійкість системи і визначення коректних параметрів регулятора. Параметри системи та регулятора визначаються таким чином, щоб корені характеристичного рівняння займали необхідне положення на  $z$ -площині. Цей метод передбачає визначення параметрів регулятора методом підбору. Усі методи ґрунтуються на базі синтезу неперервних систем.

Цифровий регулятор було створено за допомогою стандартного блоку «Discrete PID Controller» бібліотеки Simulink [33]. Також в цьому блоці крім встановлення коефіцієнтів, які були розраховані попередньо, треба задати коефіцієнт фільтра, який було визначено експериментальним шляхом і дорівнює 700. Модель створена у Simulink наведено на рис. 3.3.

На рис. 3.4 наведено модель підсистеми «PID», яка моделює роботу аналогового ПІД-регулятора і попередньо була наведена на рис. 3.3.

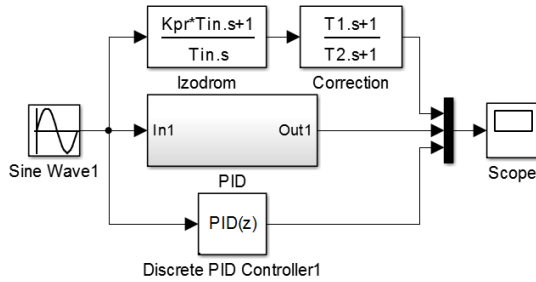


Рис. 3.3. Схема у Simulink

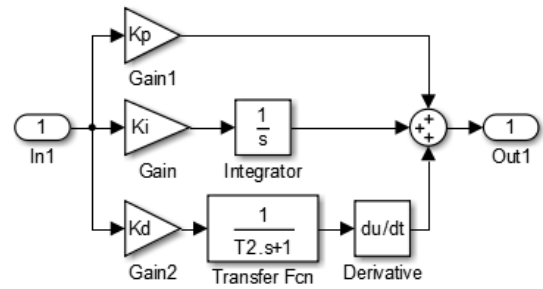


Рис. 3.4. Підсистема PID

### 3.3 Побудова логарифмічних частотних характеристик

За допомогою програмного забезпечення MatLab було побудовано логарифмічні частотні характеристики системи з цифровим ПІД-регулятором. Код програми для побудови логарифмічних частотних характеристик наведено у Додатку Б (п.1).

На рис. 3.5. Представлені логарифмічні частотні характеристики системи стабілізації.

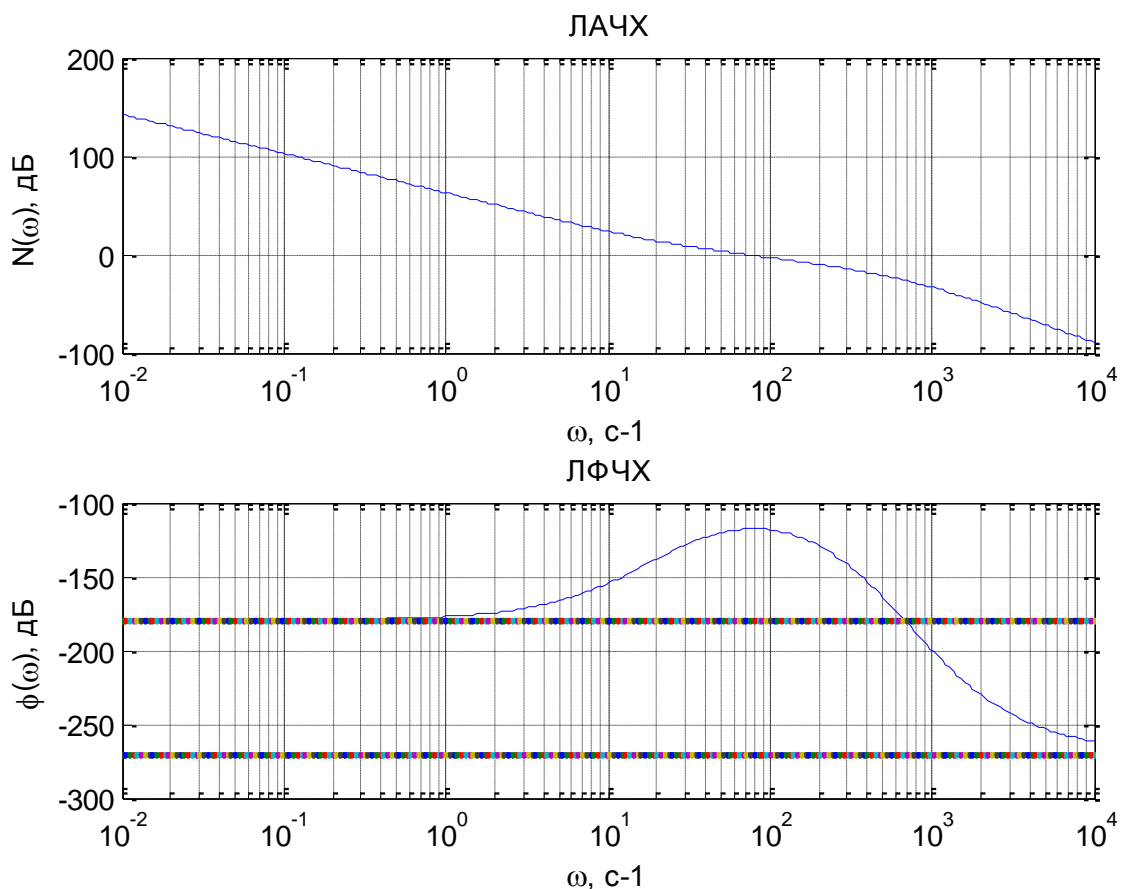


Рис. 3.5. Логарифмічні частотні характеристики системи стабілізації



З рис. 3.5 визначено, що частота зрізу дорівнює  $70\text{с}^{-1}$ , а запас стійкості по фазі дорівнює  $62^\circ$ , що є прийнятними показниками. В порівняння з частотними характеристиками системи стабілізації з неперервним регулятором, значення запасу стійкості по фазі, а також частоти зрізу практично однакові.

### 3.4 Дослідження часових характеристик

За допомогою програмного забезпечення MatLab було побудовано часові характеристики системи:

- перехідна - реакція системи на функцію Хевісайда;
- імпульсна характеристики – реакція системи на функцію Дірака.

Код програми для побудови часових характеристик наведено у Додатку Б (п.2).

На рис. 3.6 зображено модель системи для отримання перехідної характеристики

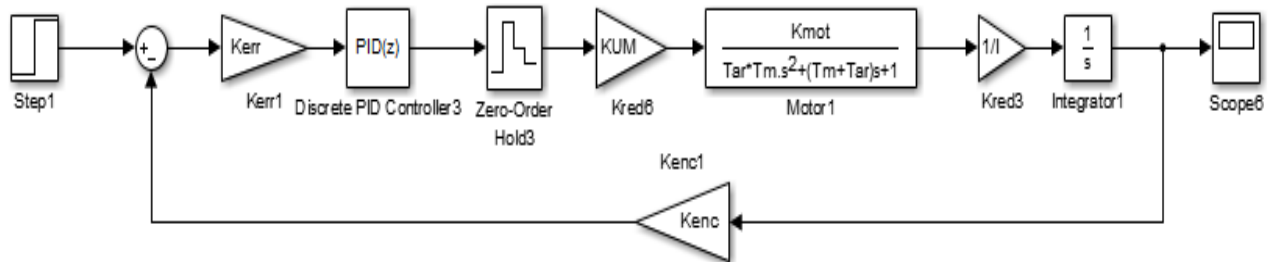


Рис. 3.6. Модель системи для отримання перехідної характеристики

На рис. 3.7 зображено модель системи для отримання імпульсної характеристики

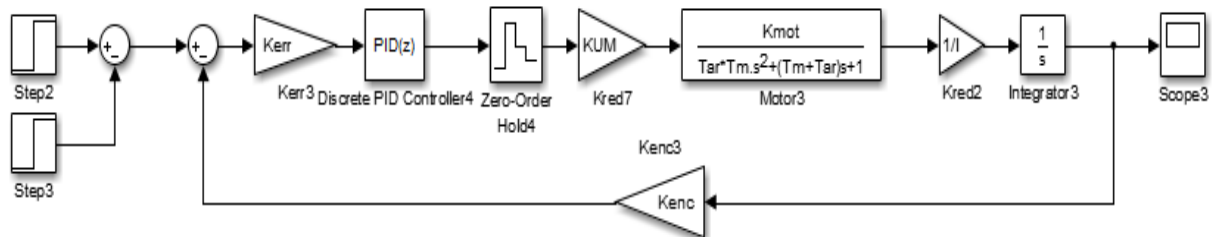


Рис. 3.7. Модель системи для отримання імпульсної характеристики

В моделі системи використовується стандартний блок бібліотеки Simulink – «Zero-Order Hold», який являє собою екстраполятор нульового порядку і використовується для відновлення дискретного сигналу в аналоговому виді при цифро-аналоговому перетворенні. Було обрано частоту дискретизація, яка дорівнює  $t_o = 0,001\text{с}$ .

На рис. 3.8 та рис. 3.9 представлені перехідна та імпульсна характеристики.

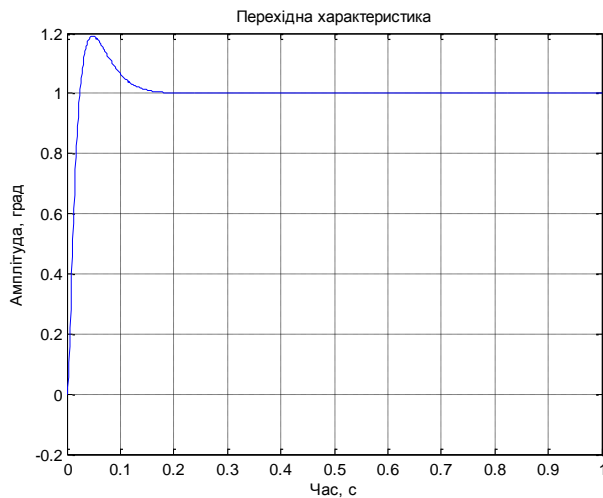


Рис. 3.8. Перехідна характеристика

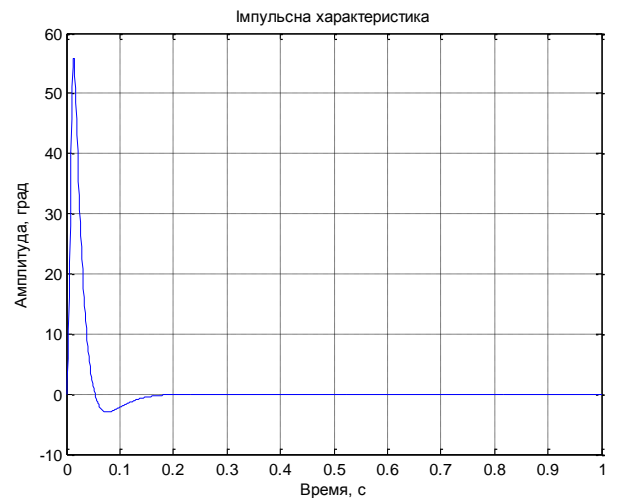


Рис. 3.9. Імпульсна характеристика

Як видно з рис. 3.8 та рис. 3.9 час закінчення перехідного процесу системи дорівнює  $t_p = 0,2$ , а перерегулювання складає менше 20%, що є прийнятним результатом, і в порівнянні з системою яка містить аналоговий регулятор, показники не погіршились.

### 3.5 Порівняння попереднього регулятора, аналогового та цифрового ПД-регулятора

Так як вже є регулятор і відомо як він відпрацьовує певні стандартні впливи, то можна порівняти розрахований ПД-регулятор з ним, за допомогою програмного забезпечення Matlab, а також Simulink.

Результат моделювання системи наведеної на рис. 3.3 представлено на рис. 3.10, і показує порівняння відпрацювання гармонічного сигналу попереднім регулятором, розрахованим ПД-регулятором, а також цифровим ПД-регулятором. На рис. 3.11 наведено результат моделювання у збільшеному масштабі, для більш точної оцінки порівняння регуляторів [33].

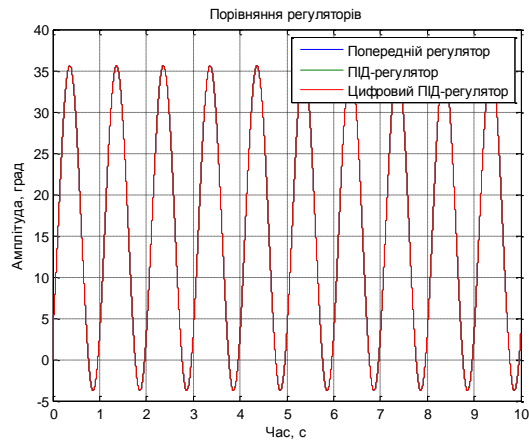


Рис. 3.10. Результат моделювання

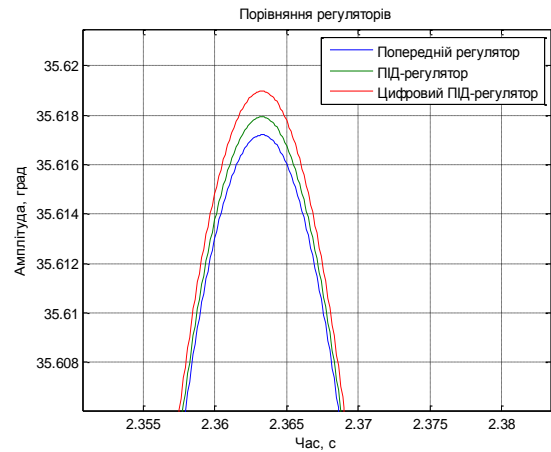


Рис. 3.11. Збільшений масштаб

Як видно, різниця між сигналами які отримані на виході регуляторів, при однаковому вхідному сигналі (амплітуда  $1^\circ$ , частота  $2 \cdot \pi$ ), сягає не більше  $0.005^\circ$ , що є гарним результатом.

### 3.6 Моделювання системи стабілізації з цифровим регулятором при типових впливах

Дослідження проведено на аналогічних типових впливах, як і у розділі 2.

Було досліджено сталий вплив на систему стабілізації, який було задано у вигляді  $L = const = M_0 = 620$ .

Модель системи у Simulink для цього типу збурення наведено на рис. 3.12. Код програми для побудови графіків для усіх типів впливів наведено у Додатку Б (п.3).

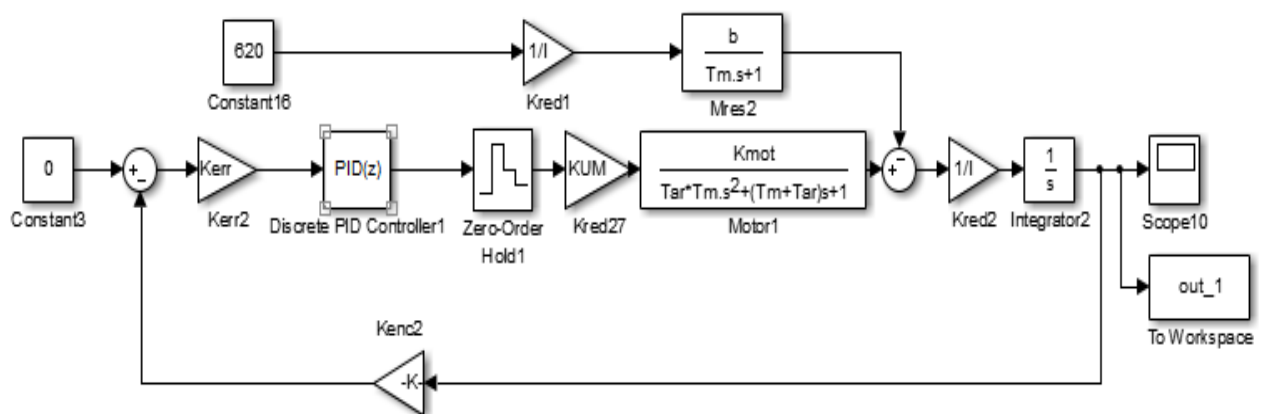


Рис. 3.12. Модель системи у Simulink для дослідження сталого впливу

Отриманий результат моделювання наведено на рис. 3.13.

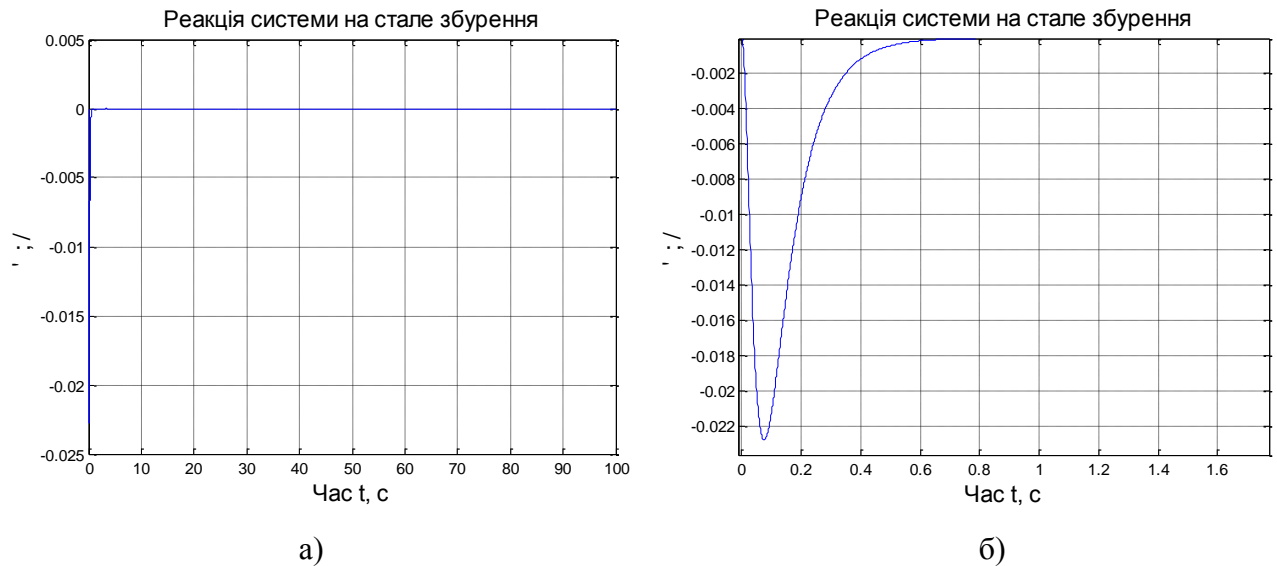


Рис. 3.13. Реакція системи на стале збурення: а) загальний вигляд; б) збільшений масштаб

При аналізі отриманих результатів (рис. 3.13), встановлено, що максимальне відхилення дорівнює приблизно  $0,02^\circ$ , але з часом система повертається в своє початкове нульове положення. Час встановлення нульового вихідного сигналу  $t = 1\text{c}$ .

Досліджено швидкісний вплив на систему стабілізації, який було задано у вигляді  $L = M_0 + m_1 t; m_1 = 0.5; m_1 = 2$ .

Модель системи у Simulink для такого збурення наведено на рис. 3.14.

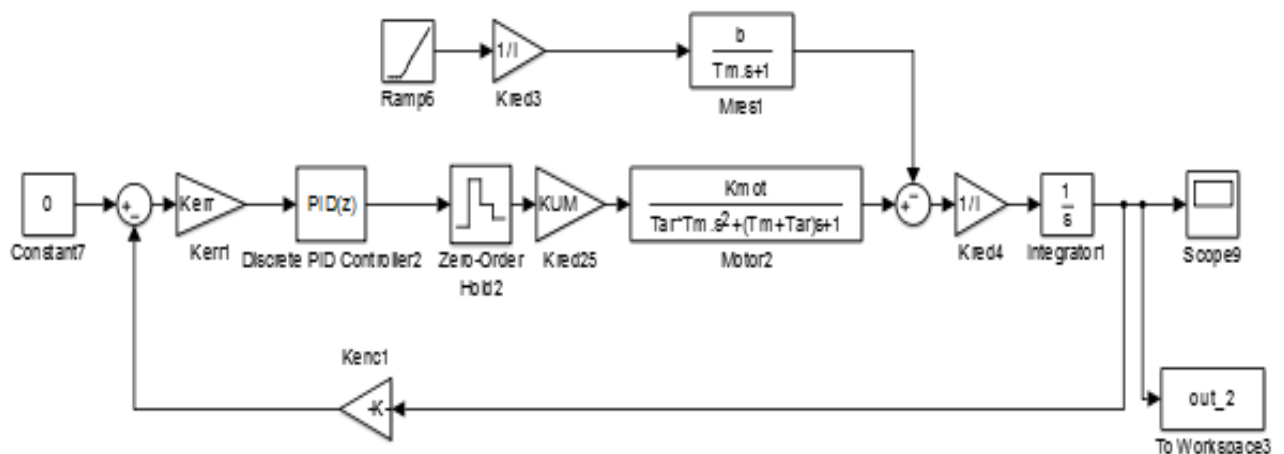


Рис. 3.14. Модель системи у Simulink для дослідження швидкісного впливу

Отриманий результат моделювання при  $m_1 = 0.5$  наведено на рис. 3.15.

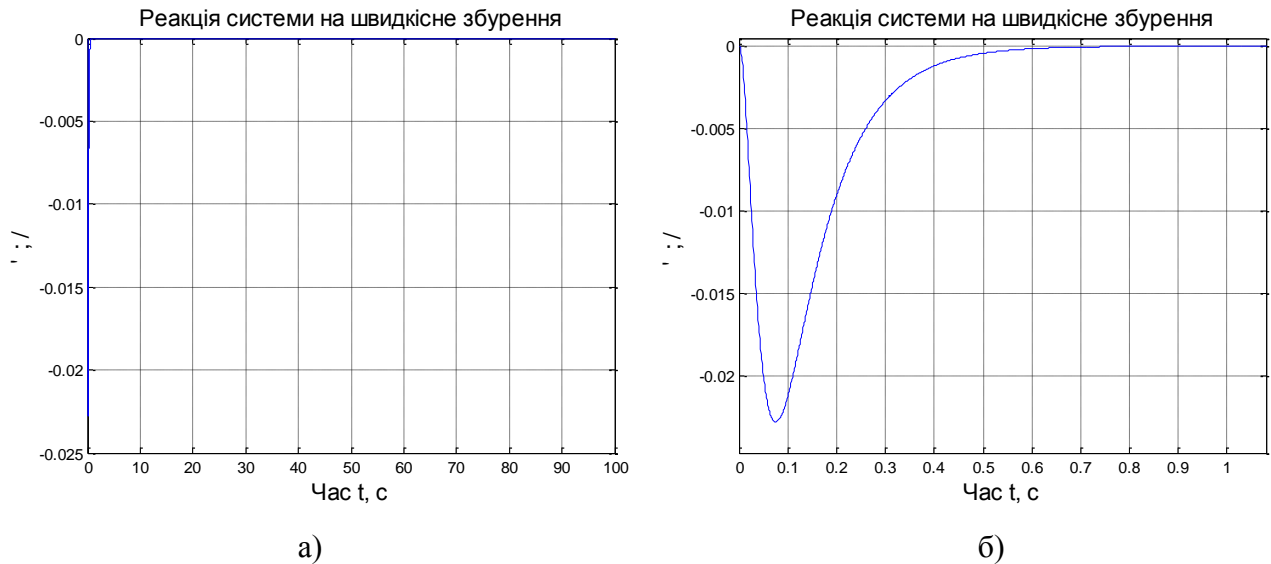


Рис. 3.15. Реакція системи на швидкісне збурення: а) загальний вигляд; б) збільшений масштаб

При аналізі отриманих результатів (рис. 3.15), було встановлено, що максимальне відхилення дорівнює приблизно  $0,022^\circ$ , але з часом система повертається в своє початкове положення з похибкою  $\delta_L = 3 \cdot 10^{-6}$ . Час встановлення у початкове положення  $t = 0,7$  c.

Отриманий результат моделювання при  $m_1 = 2$  наведено на рис. 3.16.

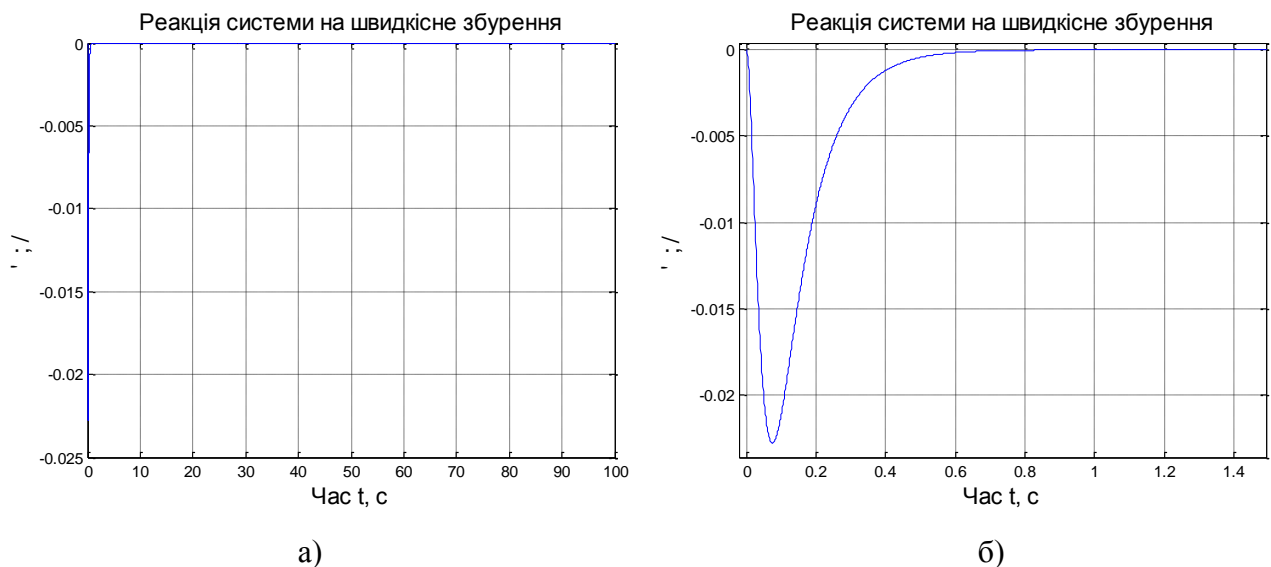


Рис. 3.16. Реакція системи на швидкісне збурення: а) загальний вигляд; б) збільшений масштаб

При аналізі отриманих результатів (рис. 3.16), встановлено, що максимальне відхилення дорівнює приблизно  $0,022^\circ$ , але з часом система повертається в своє початкове положення з похибкою  $\delta_L = 1,3 \cdot 10^{-5}$ . Але якщо порівняти з результатами коли  $m_1 = 0.5$  то

похибка встановлення в початкове положення, як можна побачити з рис. 3.15 та рис. 3.16, буде більшою.

Досліджено динамічний вплив на систему стабілізації, який було задано у вигляді  $L = M_0 + m_2 t^2; m_2 = 0.5; m_2 = 1$ .

Модель системи у Simulink для такого збурення наведено на рис. 3.17.

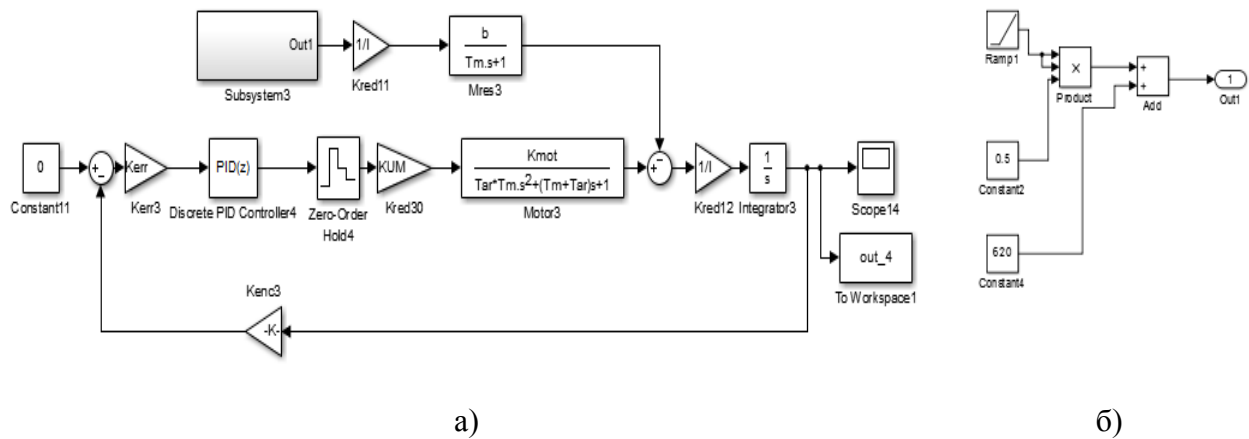


Рис. 3.17. Модель системи у Simulink для дослідження динамічного впливу: а) загальний вигляд; б) Підсистема «Subsystem 3», яка описує динамічний вплив

Отриманий результат моделювання при  $m_2 = 0.5$  наведено на рис. 3.18.

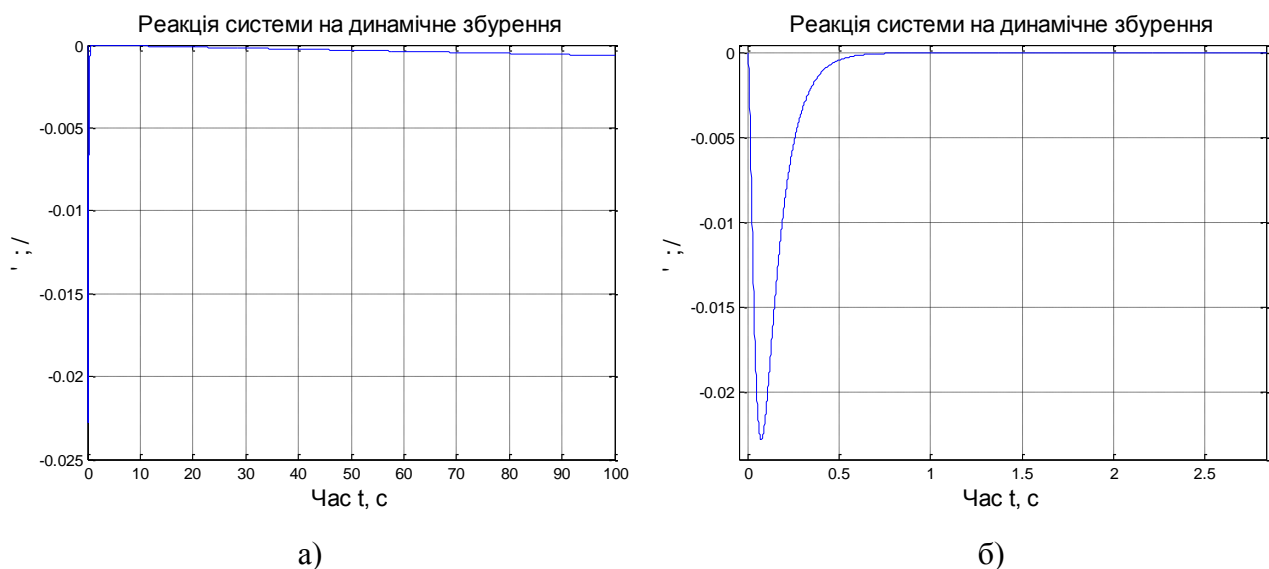
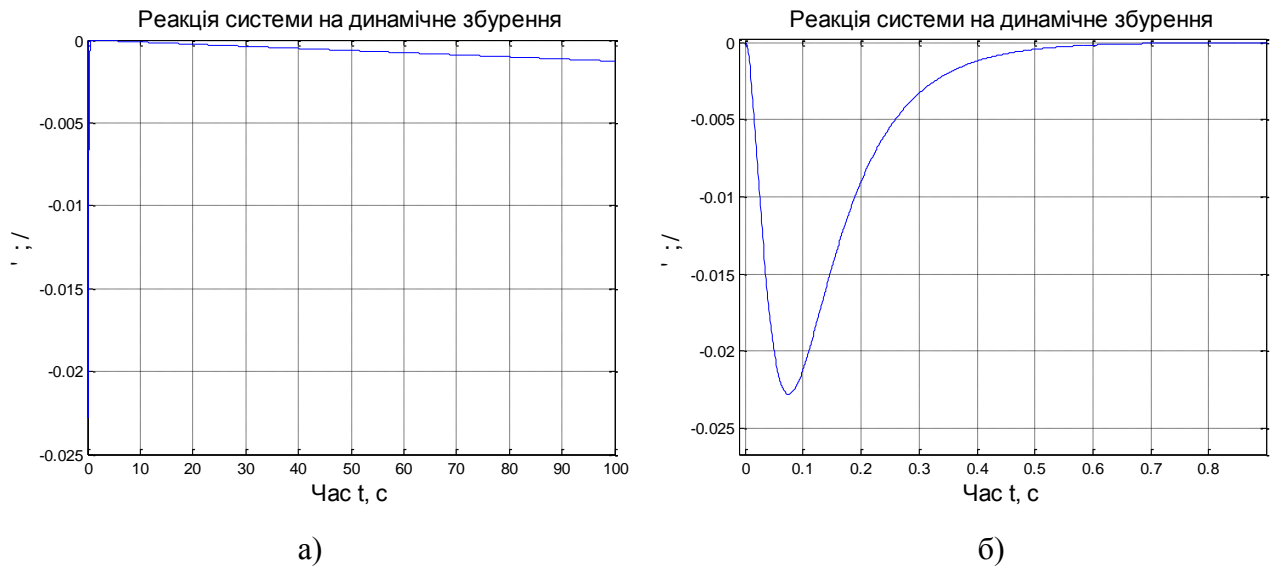


Рис. 3.18. Реакція системи на динамічне збурення: а) загальний вигляд; б) збільшений масштаб

При аналізі отриманих результатів (рис. 3.18), визначено, що похибка буде накопичуватися з часом і прагнути до нескінченності (рис. 3.18,а).

Отриманий результат моделювання при  $m_2 = 1$  наведено на рис. 3.19



При аналізі отриманих результатів якщо порівняти з результатами коли  $m_1 = 1$  то похибка накопичується швидше, як можна побачити з рис. 3.18,а та рис. 3.19,а.

Досліджено гармонічний вплив на систему стабілізації, який було задано у вигляді  $L = \sum A_i \cos(2\pi f_i t)$ ;  $A_1 = 5$ ,  $f_1 = 2\text{Гц}$ ;  $A_2 = 0,5$ ,  $f_2 = 30\text{Гц}$ ;  $A_3 = 0,1$ ,  $f_3 = 100\text{Гц}$ .

Модель системи у Simulink для такого збурення наведено на рис. 3.20.

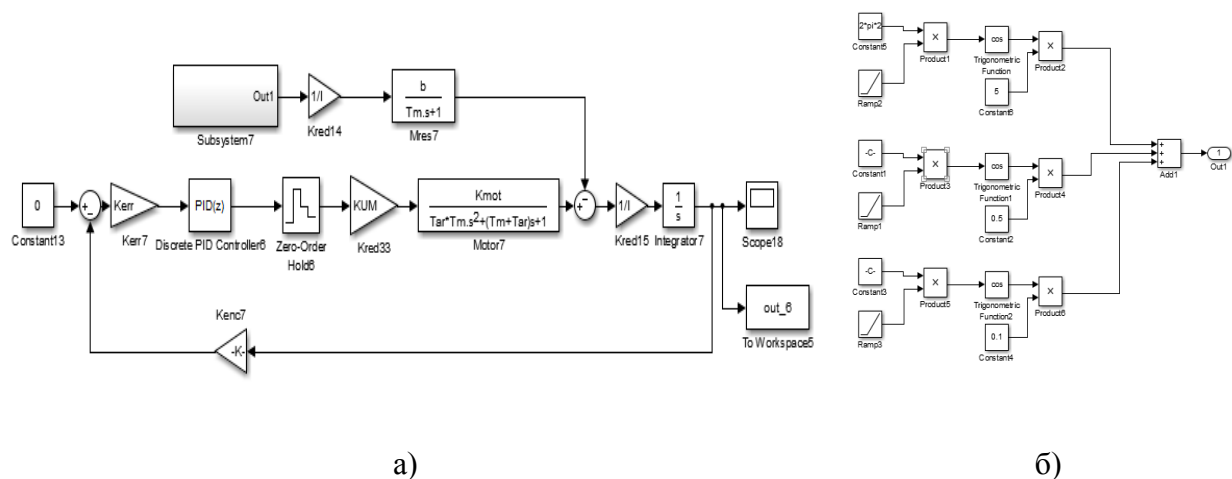


Рис. 3.20. Модель системи у Simulink для дослідження гармонічного впливу: а) загальний вигляд; б) Підсистема «Subsystem 7», яка описує гармонічний вплив

Отриманий результат моделювання наведено на рис. 3.21.

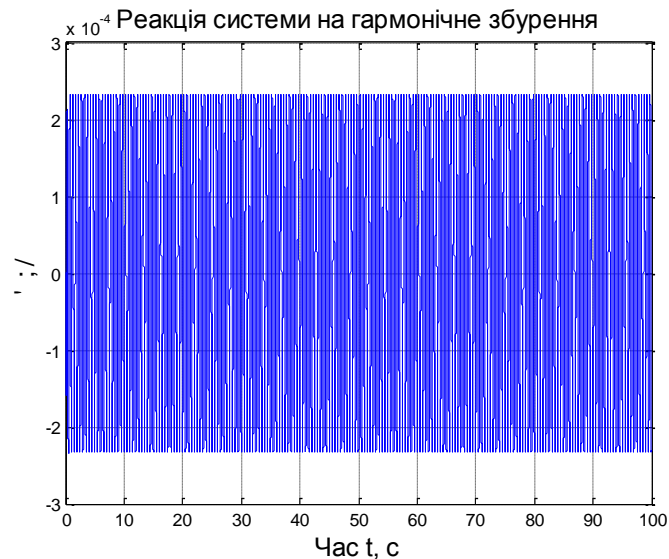


Рис. 3.21. Реакція системи на гармонічне збурення

При аналізі отриманих результатів (рис. 3.21), було визначено, що максимальні відхилення приблизно дорівнюють  $2,5 \cdot 10^{-4}$ .

Проведено дослідження реакції системи стабілізації на прикладене випадкове збурення типу «білий шум», яке було задане за допомогою блока «Band-Limited White Noise» у середовищі Simulink. Модель системи у Simulink для такого збурення наведено на рис. 3.21.

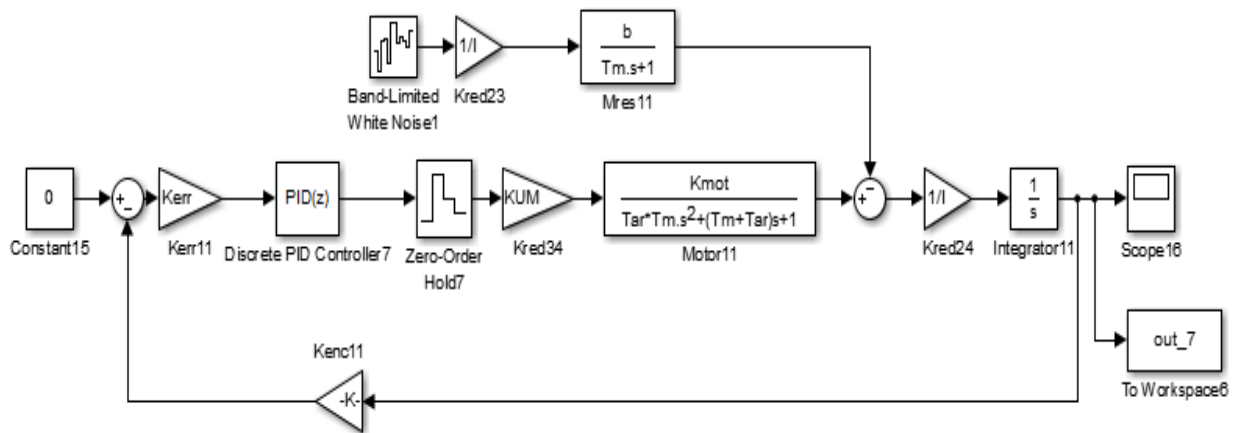


Рис. 3.22. Модель системи у Simulink для впливу типу «білий шум»

Отриманий результат моделювання наведено на рис. 3.23.



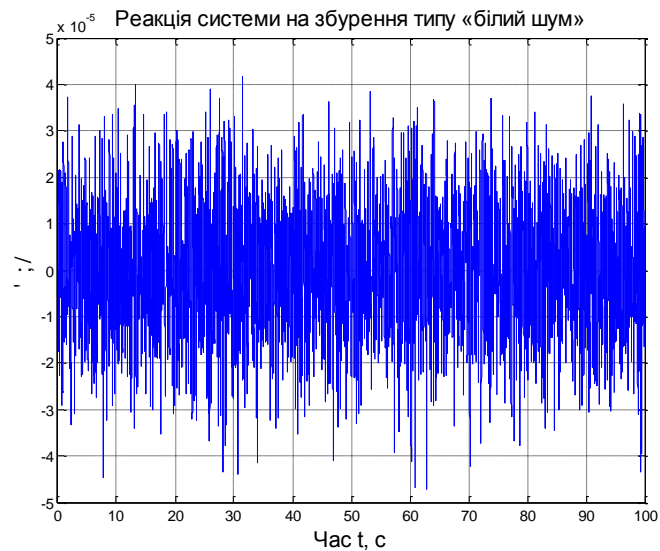


Рис. 3.23. Реакція системи на збурення типу «білий шум»

При аналізі отриманих результатів (рис. 3.23), визначено, що максимальне відхилення приблизно дорівнює  $4 \cdot 10^{-5}^\circ$ .

Після моделювання типових впливів можна зробити висновок що дана система може використовуватися, вона має невеликі значення похибок які лежать в діапазоні  $[4 \cdot 10^{-5} \dots 0.022^\circ]$ , крім прискореного впливу коли похибка прагне до нескінченості.

### Висновки до розділу 3

Розраховано коефіцієнти ПД-регулятора на основі попереднього регулятора, який досліджувався у розділі 2.

Було зроблено перехід до цифрового регулятора, за допомогою стандартного блока Simulink, використовуючи параметри розраховані попередньо.

Порівняно частотні характеристики системи стабілізації обладнання з цифровим ПД-регулятором та системи з неперервним регулятором, і вони є практично однаковими.

Значення часу закінчення перехідного процесу та перерегулювання практично ідентичні системі з неперервним регулятором

Виконано порівняльний аналіз динамічних характеристик аналогового попереднього регулятора, аналогового ПД-регулятора, цифрового ПД-регулятора. Значення похибки відпрацювання між різними регуляторами на однаковий вхідний вплив є прийнятним, і складає не більше  $0.005^\circ$ .

Порівнявши результати моделювання системи стабілізації обладнання на типові збурення, встановлено, що використання цифрового ПД-регулятора у системі стабілізації обладнання є цілком доцільно. Отримані значення похибок аналогічні системі з аналоговим

«нетиповим» регулятором і лежать в діапазоні  $[4 \cdot 10^{-5} \circ \dots 0,022 \circ]$ . При сталому, швидкісному, гармонічному впливі та впливі типу «білий шум» існує невелике відхилення, а при динамічному впливі похибка прямує до нескінченості.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРИ ВИПАДКОВИХ ВПЛИВАХ

#### 4.1 Аналіз випадкових впливів на об'єкт стабілізації

Вплив нерівностей доріг, поверхні місцевості по якій рухається об'єкт, обумовлюють динамічні збурення на встановлене обладнання.

Нерівності доріг чи поверхні руху об'єкта визначаються їх рельєфом, який розглядається як сукупність реалізацій випадкових поверхонь для твердої ділянки дороги, за якими можна визначити характеристики нерівностей [34]. Профілем дороги є перетин рельєфу в напрямку руху транспортного засобу. Перетин поверхні конкретної ділянки дороги є реалізацією профілю, а сукупність таких реалізацій дозволяє розглядати профіль дороги як випадковий процес. Профіль дороги залежить від вибору перетину, тому його проводять зазвичай по колії руху. В залежності від довжини хвилі нерівностей розглядаються три складові профілю: макропрофіль, мікропрофіль і шорсткість, що обумовлено їх різним впливом на транспортний засіб. Зазвичай профіль нерівностей доріг описується випадковою функцією висот нерівностей дороги, яка може залежати від довжини, тобто пройденої відстані, або часу. Макропрофіль складається лише з довгих плавних нерівностей (довжина хвилі 100 м і більше), практично не викликає коливань транспортного засобу на підвісці, але помітно впливає на динаміку автомобіля. Мікропрофіль складається з нерівностей (довжина хвилі від 10 см до 100 м), що викликають помітні коливання автомобіля на підвісці, але не має тривалих спусків і підйомів. Шорсткість (довжина хвилі менше 10 см) згладжуються за допомогою шин і не викликають суттєвих коливань автомобіля.

На сьогоднішній день існує декілька методів отримання параметрів профілю дороги [27]. Найпростіші з них це безпосереднє або непряме вимірювання профілю. Під безпосереднім вимірюванням мається на увазі вимірювання за допомогою спеціального приладу – нівеліру. Цей метод дозволяє точно оцінити довгі і дуже короткі нерівності, але є дуже трудомістким і практично не містить інформації про низькі частоти мікропрофілю. Для непрямого вимірювання використовується п'яте колесо, яке прилаштоване до автомобіля, але цей метод не врахує прогинання шини, тому також практично не містить інформації про низькі частоти. Самим сучасним методом є вимірювання за допомогою лазерних систем. У цьому методі необхідно адаптувати вихідний сигнал до різних умов відбиття та висвітлення.

Під час визначення збурень замість профілю використовується мікропрофіль, тому що він не містить низькочастотних складових, це головна відмінність його від профілю.

Перевагою такої заміни є те, що мікропрофіль можна вважати стаціонарною випадковою функцією, що забезпечує можливість його використання в задачах синтезу та аналізу систем стабілізації рухомого наземного об'єкта.

Характеристики профілю та мікропрофілю є випадковими величинами, тому можна використовувати таку їх характеристику, як спектральна щільність. Класифікація спектральних щільностей профілю ґрунтових доріг та місцевості виконується за рівнем коротких нерівностей мікропрофілю.

Модель об'єкта в базовій системі координат наведено на рис. 4.1.

Рис. 4.1. Модель колісного рухомого об'єкта в базовій системі координат

Базова система координат, відносно якої досліджується рух об'єкта, повинна задовольняти таким умовам [35]:

- початок координат (точка  $O$ ) знаходиться на рівні дороги в її ідеальному горизонтальному стані;
- вісь  $Z$  направлена вертикально, а вісь  $X$  відповідає положенню поздовжньої осі екіпажу при його ідеальному положенні в момент початку руху.

Макропрофіль шляху формується за допомогою двох плоских кривих: перша крива є планом шляху і задається координатами  $x_i$  та  $y_i$  в базовій системі координат; друга крива є вертикальним профілем колії і задається вертикальною координатою  $z_i$  та пройденим шляхом  $s_i$  уздовж реальної траєкторії шляху.

В табл. 4.1 наведено класи доріг та відповідні їм значення рівня нерівностей [35] за стандартом ISO 8608, який вводиться класифікацію рівня нерівностей (А-Н) і спектральну щільність потужності, яка може бути використана для генерації випадкових нерівностей.

Таблиця 4.1 Класифікація доріг за рівнем нерівності

Клас дороги	Рівень нерівності, $S_0 (\times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{коливання})$
A(дуже добра)	<8
B(добра)	8-32
C(задовільна)	32-128
D(погана)	128-512
E(дуже погана)	512-2048
F	2048-8192
G	8192-32768
H	>32768

#### 4.2 Моделювання та аналіз реакції системи стабілізації з аналоговим регулятором на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта

Для аналізу розглядається система стабілізації обладнання, яка була описана у розділі 2. У пакеті Matlab Simulink розроблено схему (рис. 4.2) для моделювання реакції системи на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта. Для створення схеми моделювання були використанні такі стандартні блоки пакету Simulink: Constant, Transfer Fcn, Gain, Integrator, Scope, Random Number, Sum. Випадкове збурення подається на систему через канал збурення за допомогою блоку Random Number (генератор випадкового сигналу з нормальним розподілом), вхідний сигнал є нульовим, реакцію системи отримуємо з блоку Scope. За таких умов реакція системи на зовнішнє збурення є похибкою системи. Код програми наведено у Додатку В (п.1).

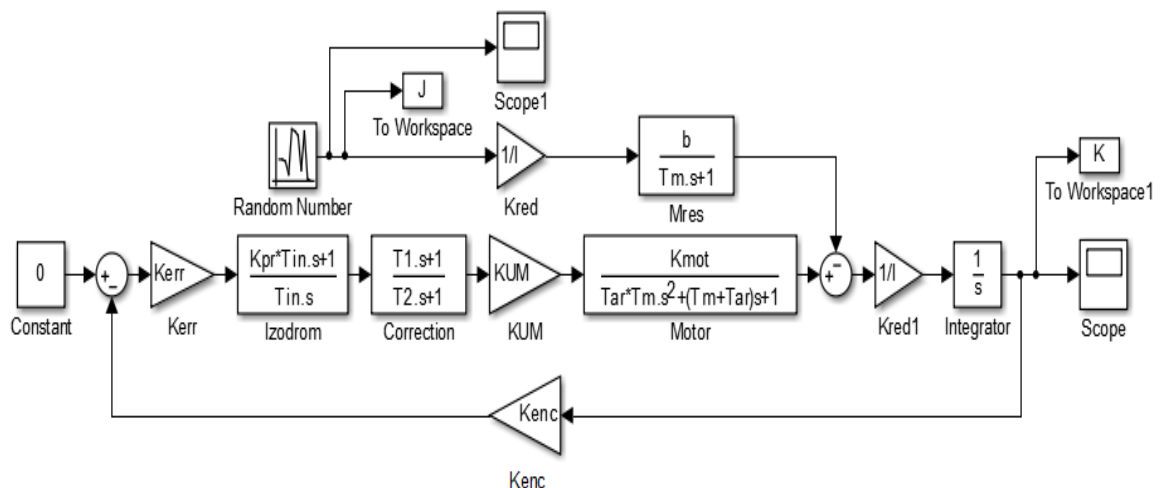


Рис. 4.2. Схема моделювання реакції системи стабілізації на випадкове збурення

Випадкове збурення є випадковим стаціонарним процесом з обмеженням за частотою спектром (до 10 Гц), довжина реалізації визначалась часом 10 с з періодом дискретизації 0,05 с. Середні значення та середні квадратичні відхилення (СКВ) випадкового збурення задавались відповідно до наведених вище класів доріг з нерівностями, для яких проведено моделювання руху об'єкта. Результати моделювання наведено на рис.4.3 – рис.4.7 у вигляді часових реалізацій збурення  $F(t)$  та реакції системи стабілізації  $\phi_{вих}(t)$ , а також спектральної щільності потужності реакції системи  $S_{\phi}(f)$ , як функції циклічної частоти.

- Моделювання нерівностей дороги класу А (рівень нерівності  $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ).  
Результати моделювання наведено на рис. 4.3.

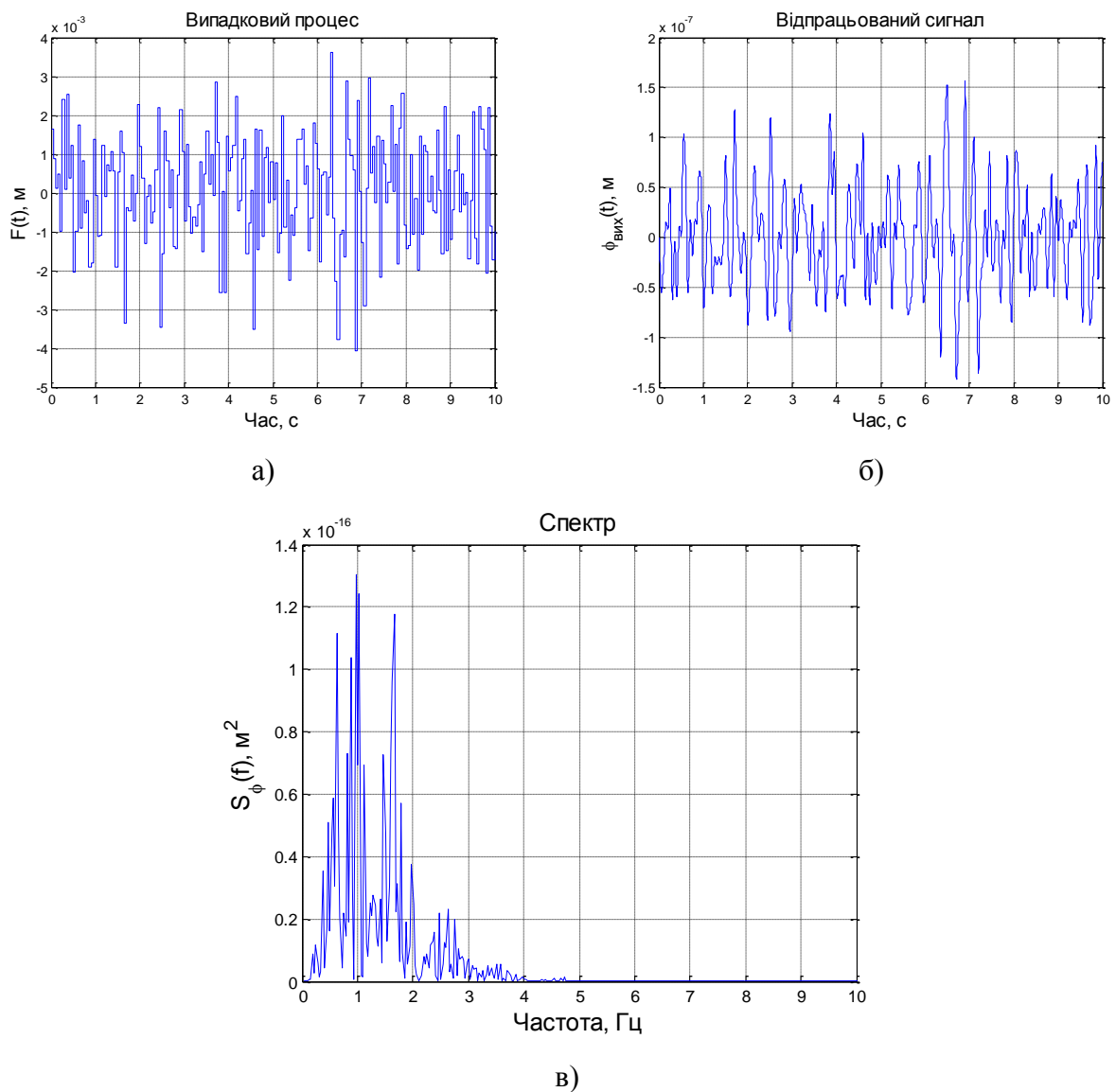


Рис. 4.3. Результати моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностям дороги класу А: а) вхідне збурення; б) реакція системи; в) спектр вхідного сигналу

- Моделювання нерівностей дороги класу В (рівень нерівності  $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ).

Результати моделювання наведено на рис. 4.4.

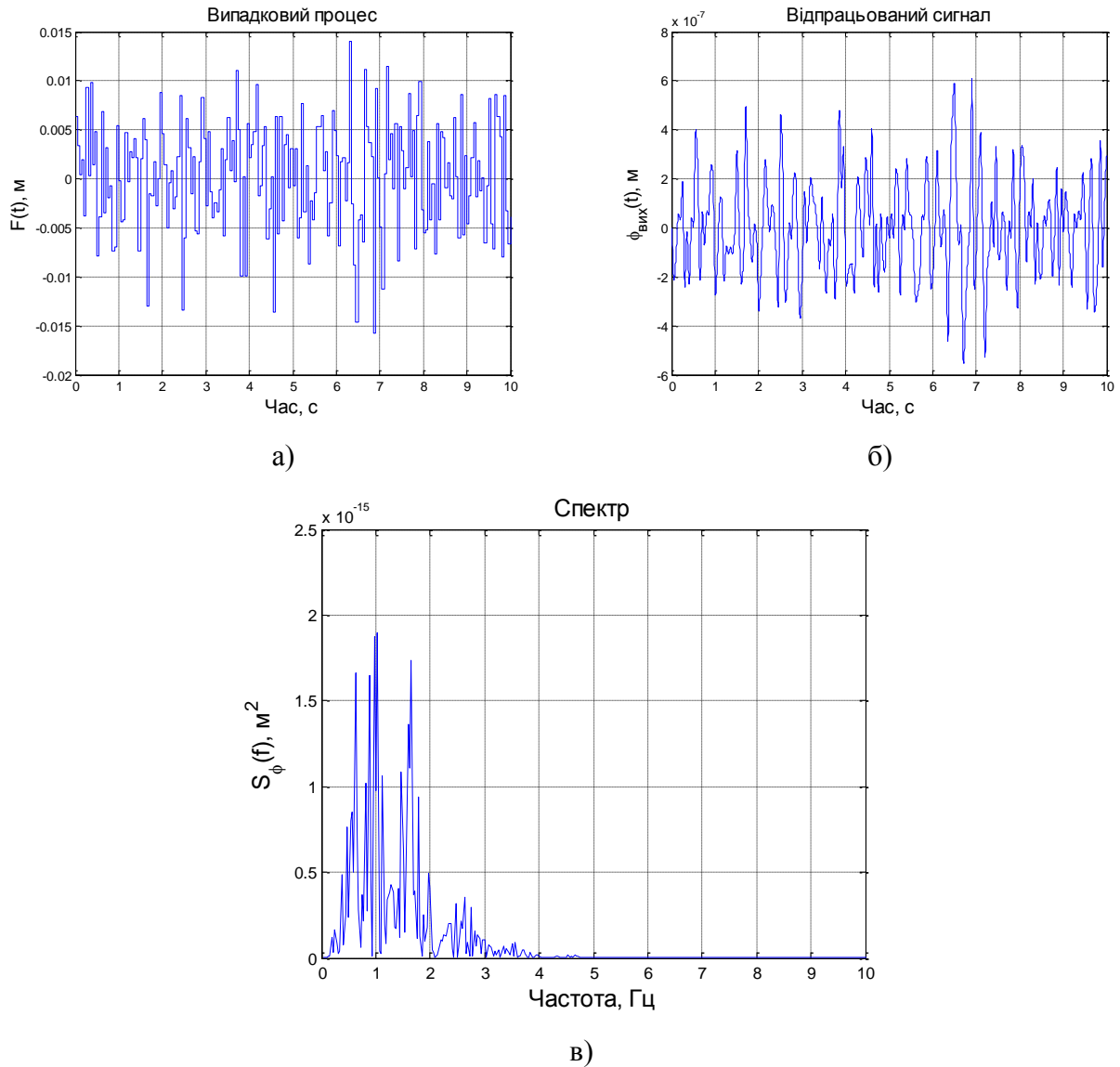
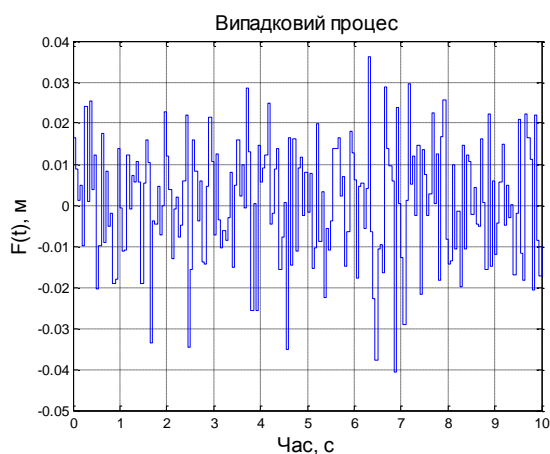


Рис. 4.4. Результати моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностям дороги класу В: а) вхідне збурення; б) реакція системи; в) спектр вихідного сигналу

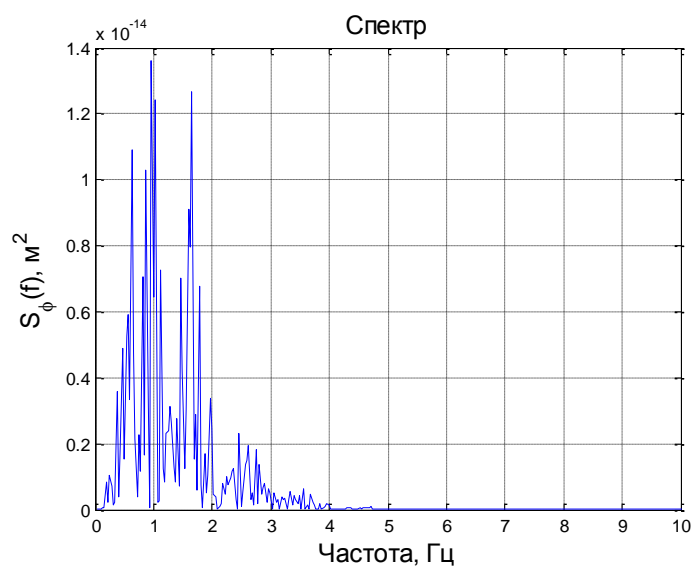
- Моделювання нерівностей дороги класу D (рівень нерівності  $200 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$  -  $500 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ). Результати моделювання наведено на рис. 4.5 та рис. 4.6.



а)

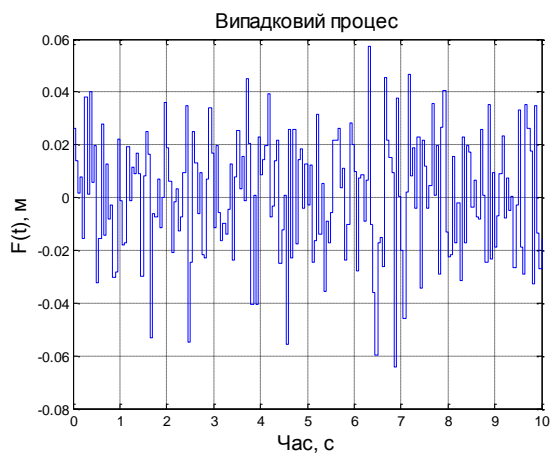


б)



в)

Рис. 4.5. Результати моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностями дороги класу D (рівень нерівності  $200 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ): а) вхідне збурення; б) реакція системи; в) спектр вихідного сигналу



а)



б)



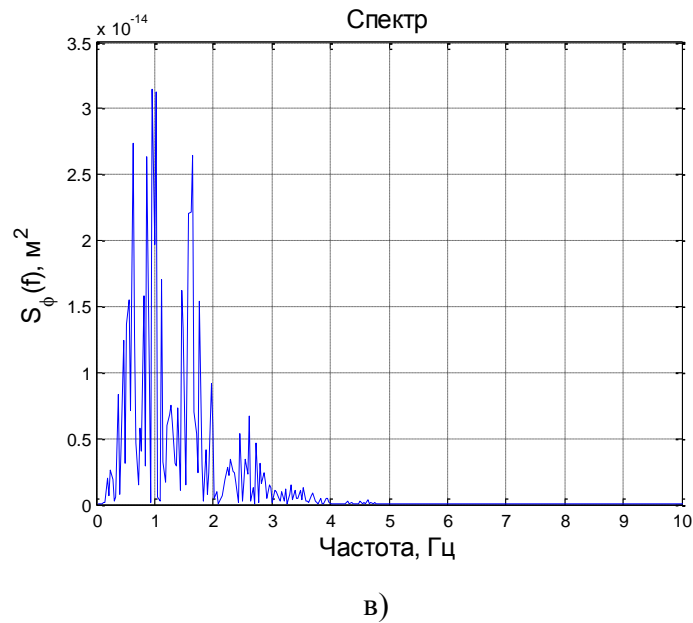


Рис. 4.6. Результати моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностями дороги класу D (рівень нерівності  $500 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ): а) вхідне збурення; б) реакція системи; в) спектр вихідного сигналу

В табл. 4.2 наведено значення СКВ наведених реалізацій вхідних випадкових збурень  $\sigma_F$  та вихідних сигналів системи  $\sigma_\phi$  для розглянутих класів дороги з нерівностями.

Таблиця 4.2 Значення СКВ вхідних збурень та вихідних сигналів

Клас дороги	A	B	D ( $200 \cdot 10^{-6}$ )	D ( $500 \cdot 10^{-6}$ )
$\sigma_F$ , м	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
$\sigma_\phi$ , м	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$1,86 \cdot 10^{-7}$	$4,81 \cdot 10^{-7}$	$7,61 \cdot 10^{-7}$

Як видно з наведених результатів моделювання, досліджувана система стабілізації обладнання є ефективною для об'єктів, що рухаються по дорогах з нерівностями відповідно до розглянутих класів доріг. В умовах руху об'єкта по дорогах перших чотирьох класів з наведених в табл. 4.1, вплив нерівності поверхні руху проявляється як випадкова похибка, значення якої не буде перевищувати 2,3 мкм. Спектр похибки зосереджений у смузі частот, яка приблизно вдвічі вужча за смугу частот вхідного випадкового збурення, та відрізняється тільки значеннями (зростають відповідно до підвищення рівня нерівностей).

#### 4.3 Моделювання та аналіз реакції системи стабілізації з цифровим регулятором на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта

Для аналізу розглядається система стабілізації обладнання, яка була описана у розділі 3, і містить цифровий ПД-регулятор. У пакеті Matlab Simulink розроблено схему (рис. 4.7) для моделювання реакції системи на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта. Випадкове збурення подається на систему через канал збурення за допомогою блоку Random Number (генератор випадкового сигналу з нормальним розподілом), вхідний сигнал є нульовим, реакцію системи отримуємо з блоку Scope. За таких умов реакція системи на зовнішнє збурення є похибкою системи. Код програми наведено у Додатку В (п.2).

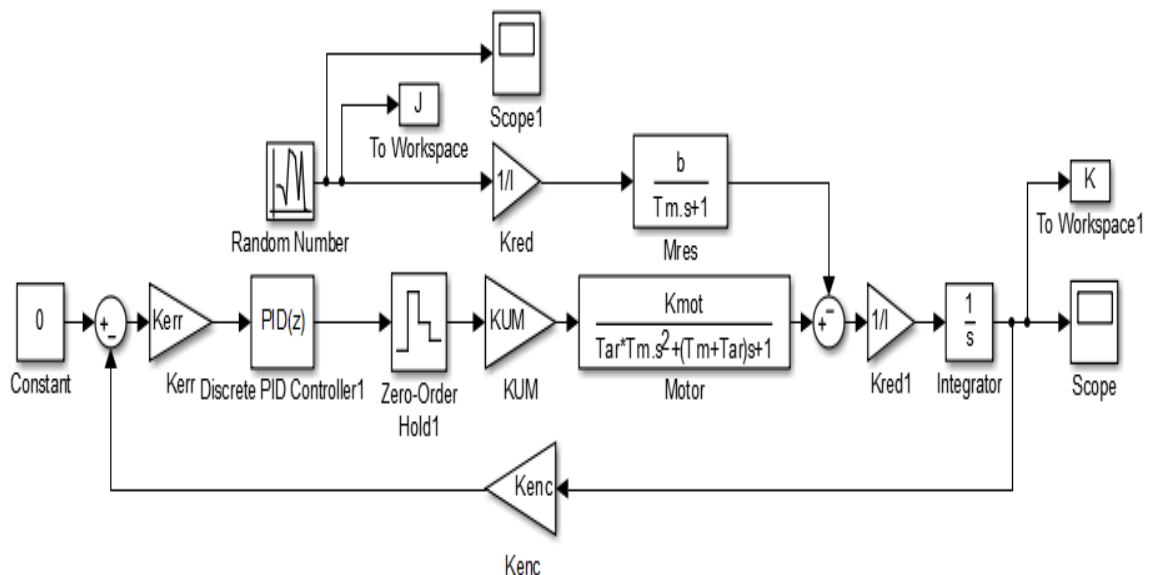


Рис. 4.7. Схема моделювання реакції системи стабілізації на випадкове збурення

Як і в попередньому випадку, випадкове збурення є випадковим стаціонарним процесом з обмеженим за частотою спектром (до 10 Гц), довжина реалізації визначалась часом 10 с з періодом дискретизації 0,05 с. Середні значення та СКВ випадкового збурення задавались відповідно до наведених вище класів доріг з нерівностями, для яких проведено моделювання руху об'єкта. Результати моделювання наведено на рис.4.9 – рис.4.12 у вигляді часових реалізацій збурення  $F(t)$  та реакції системи стабілізації  $\varphi_{вих}(t)$ , а також спектральної щільності потужності реакції системи  $S_{\varphi}(f)$ , як функції циклічної частоти.

- Моделювання нерівностей дороги класу А (рівень нерівності  $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ).  
Результати моделювання наведено на рис. 4.8.

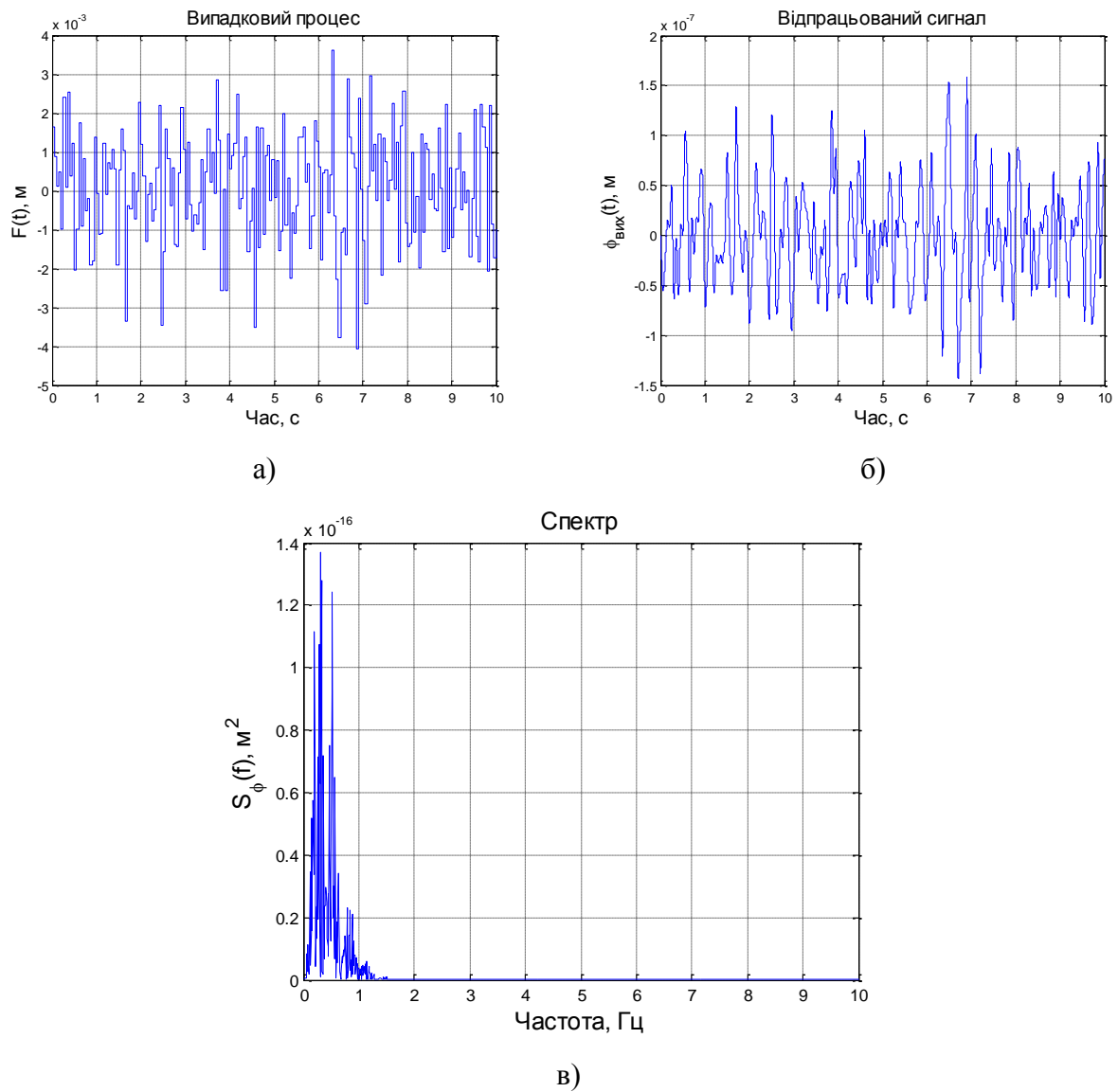


Рис. 4.8. Результати моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностям дороги класу А: а) вхідне збурення; б) реакція системи; в) спектр вихідного сигналу

- Моделювання нерівностей дороги класу В (рівень нерівності  $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ).  
Результати моделювання наведено на рис. 4.9.

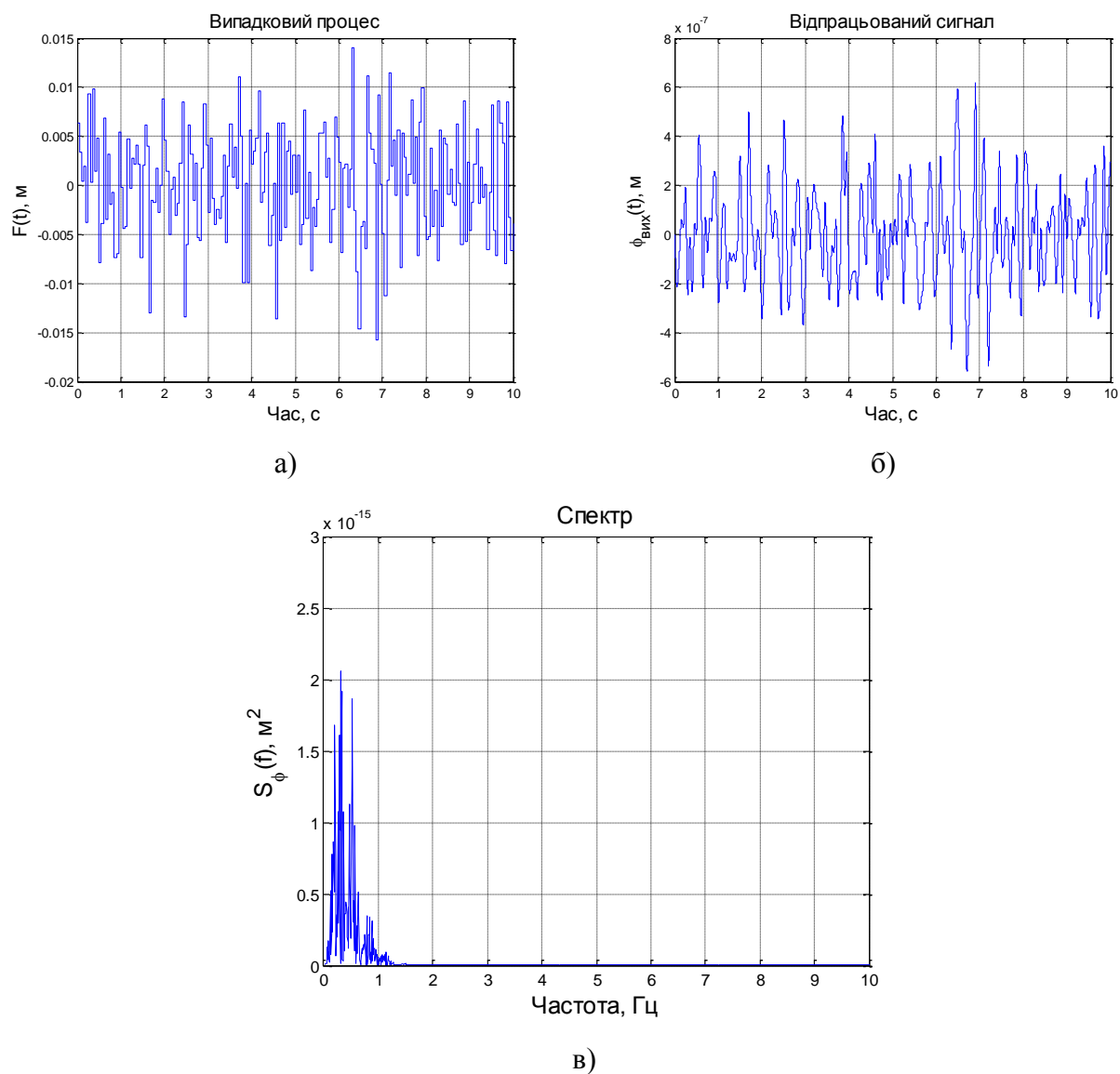
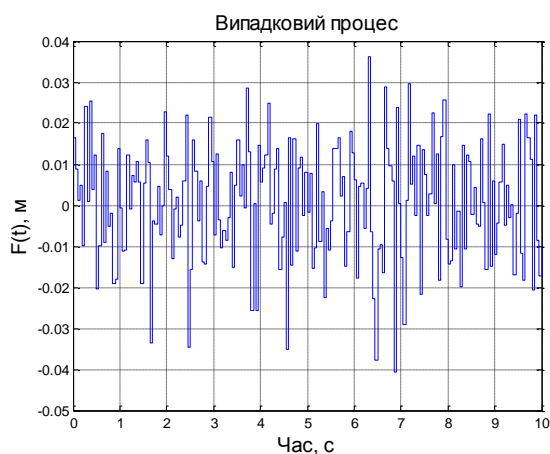


Рис. 4.9. Результати моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностям дороги класу В: а) вхідне збурення; б) реакція системи; в) спектр вихідного сигналу

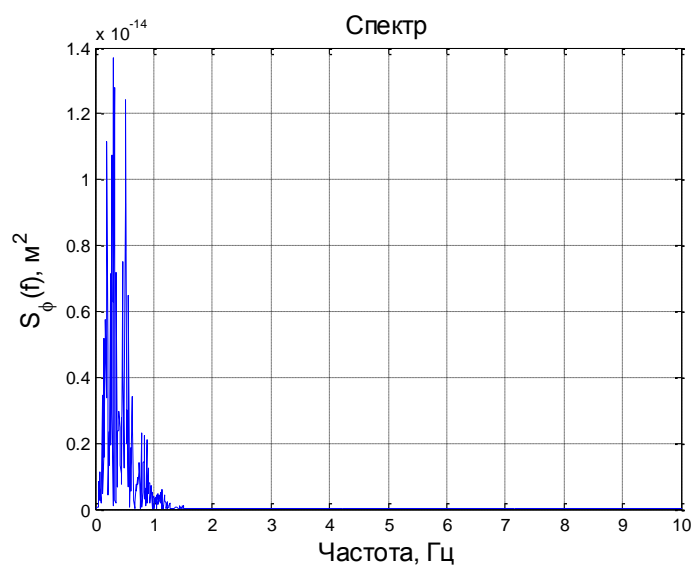
- Моделювання нерівностей дороги класу D (рівень нерівності  $200 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$  -  $500 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ). Результати моделювання наведено на рис. 4.10 та рис. 4.11.



а)

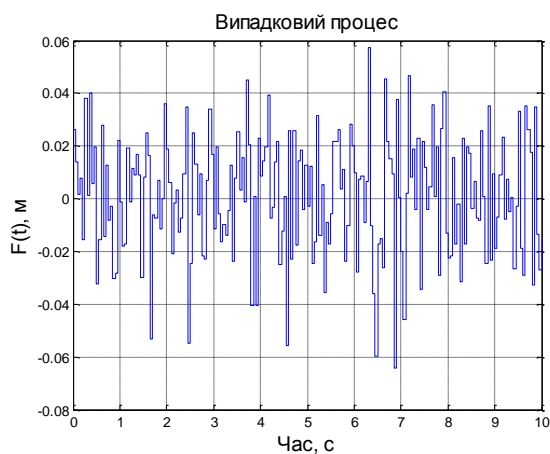


б)

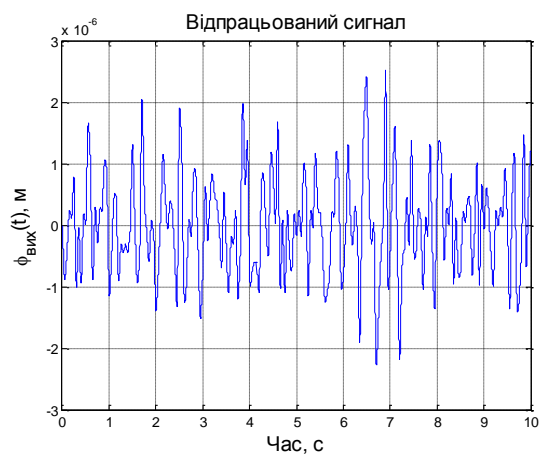


в)

Рис. 4.10. Результати моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностями дороги класу D (рівень нерівності  $200 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ): а) вхідне збурення; б) реакція системи; в) спектр вихідного сигналу



а)



б)

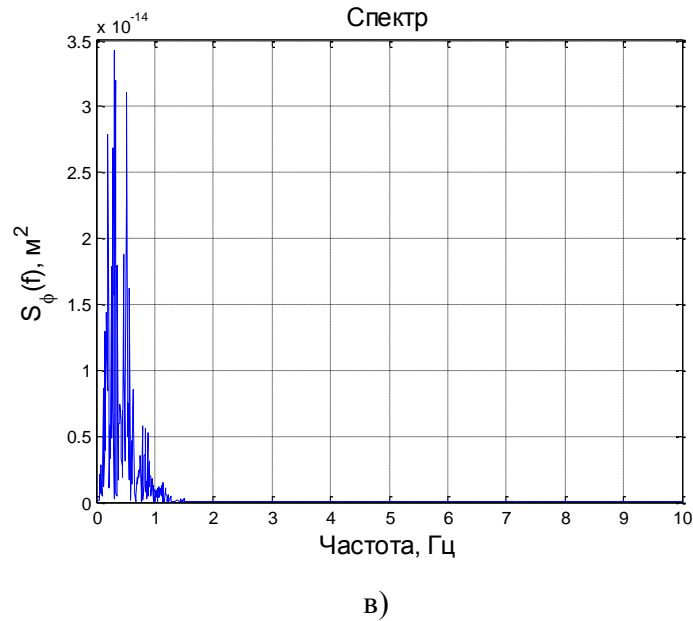


Рис. 4.11. Результати моделювання реакції системи стабілізації на випадкові збурення, обумовлені нерівностям дороги класу D (рівень нерівності  $500 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{коливання}$ ): а) вхідне збурення; б) реакція системи; в) спектр вихідного сигналу

В табл. 4.3 наведено значення СКВ наведених реалізацій вхідних випадкових збурень  $\sigma_F$  та вихідних сигналів системи  $\sigma_\phi$  для розглянутих класів дороги з нерівностями.

Таблиця 4.3. Значення СКВ вхідних збурень та вихідних сигналів

Клас дороги	A	B	D ( $200 \cdot 10^{-6}$ )	D ( $500 \cdot 10^{-6}$ )
$\sigma_F$ , м	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
$\sigma_\phi$ , м	$4,85 \cdot 10^{-8}$	$1,88 \cdot 10^{-7}$	$4,85 \cdot 10^{-7}$	$7,67 \cdot 10^{-7}$

В табл. 4.4 наведено порівняння СКВ вихідних сигналів які були отриманні системою з аналоговим регулятором та системою з цифровим ПД-регулятором.

Таблиця 4.4. Порівняння значень СКВ вихідних сигналів

	Тип регулятора	Клас дороги			
		A	B	D ( $200 \cdot 10^{-6}$ )	D ( $500 \cdot 10^{-6}$ )
$\sigma_\phi$ , м	аналоговий	$4,8 \cdot 10^{-8}$	$1,86 \cdot 10^{-7}$	$4,81 \cdot 10^{-7}$	$7,61 \cdot 10^{-7}$
	цифровий	$4,85 \cdot 10^{-8}$	$1,88 \cdot 10^{-7}$	$4,85 \cdot 10^{-7}$	$7,67 \cdot 10^{-7}$
$\Delta\sigma_\phi$ , м		$0,05 \cdot 10^{-8}$	$0,02 \cdot 10^{-7}$	$0,04 \cdot 10^{-7}$	$0,06 \cdot 10^{-7}$

Як видно з табл. 4 досліджувана система стабілізації обладнання з цифровим ПД-регулятором показала результати, відповідні до аналогічної системи з попереднім регулятором (розділ 4.2), яка бралась за еталону, розраховані похибки є дуже малими і знаходяться в межах від  $0,05 \cdot 10^{-8}$  м до  $0,06 \cdot 10^{-7}$  м, що є прийнятним результатом.

#### **Висновки до розділу 4**

Проаналізовано можливі випадкові впливи, які можуть діяти на об'єкт стабілізації. Визначено основні характеристики нерівностей доріг, по яким може рухатись транспорт на якому встановлено систему стабілізації обладнання.

Проведено моделювання системи з аналоговим регулятором на випадкові впливи, для доріг класу А, В, D. Дплив нерівності поверхні руху проявляється як випадкова похибка, значення якої не буде перевищувати 2,3 мкм. Спектр похибки зосереджений у смузі частот, яка приблизно вдвічі вужча за смугу частот вхідного випадкового збурення, та відрізняється тільки значеннями (зростають відповідно до підвищення рівня нерівностей).

Проведено моделювання системи з цифровим ПД-регулятором. За результатами моделювання визначено, що похибки системи знаходяться на рівні похибок системи з аналоговим регулятором, що є прийнятним результатом, а також, що розрахований цифровий ПД-регулятор у системі стабілізації обладнання цілком доцільно використовувати.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ З ЦИФРОВИМ РЕГУЛЯТОРОМ»

#### 5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

5.1.1 Зміст ідеї полягає у розробці системи стабілізації обладнання з цифровим регулятором, для покращення характеристик стабілізації різноманітного обладнання у просторі. Проаналізовано можливі напрямки застосування, а також основні вигоди, що може отримати потенційний користувач товару за різними напрямками застосування (табл. 5.1) [36].

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система стабілізації обладнання з цифровим регулятором	1. Кінематограф	Підвищення якості зйомки, завдяки кращій стабілізації камери. Можливість зйомки у важких та більш екстремальних умовах.
	2. Військова промисловість	Покращення стабілізації обладнання різних масогабаритних параметрів яке встановлюється на військову техніку
	3. Авіація	Покращення стабілізації обладнання на борту авіаційної техніки
	4. Морська справа	Внаслідок хвиль, морський транспорт піддається хитами, в наслідок чого обладнання встановлене на ньому потребує точної стабілізації.

Висновки: Як видно з таблиці 5.1 існує досить багато сфер де актуальне використання запропонованої ідеї. Потенційних споживачів можна знайти як у цивільних сферах, таких як кінематограф, авіація, морська справа, а також і у військовій сфері. Слід зазначити, що іноді гіростабілізатори використовуються для непрофесійної зйомки (наприклад зйомка з квадрокоптера). А також існує багато вигод для потенційних користувачів.

5.1.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї, основні відмінності від аналогів які вже існують, а також товарів-замінників (табл. 5.2) [36]. Порівняння із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;



- визначення попередніх конкурентів;
- порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні).

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	DJI	Карат	Feiyu			
1	Вартість	3000 ум.од.	2000 ум.од.	4000 ум.од.	500 ум.од.		Середня вартість	
2	Маса	4 кг	1.2 кг	2.5 кг	0.6 кг	Велика маса		
3	Гарантійний термін	2 роки	2 року	2 року	1 рік		Однаковий гарантійний термін	
4	Швидкість	0.2 с	0.5 с	1 с	1 с			Найкраща швидкість
5	Максимальна маса стабілізованого обладнання	До 10 кг	До 1 кг	До 6 кг	До 0.5 кг			Найвища максимальна маса об'єкту стабілізації

Висновки: Визначено трьох потенційних конкурентів (DJI, Карат, Feiyu) і проведено порівняння основних техніко-економічних характеристик. Як видно з таблиці 5.2 проект має слабку сторону стосовно маси системи, нейтральні сторони має стосовно ціни та гарантійного терміну. Але має переваги у швидкодії самої системи, а також у максимальній масі стабілізованого обладнання.

## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Проведено аудит технології за допомогою якою можна реалізувати ідею проекту (табл. 5.3) [36]. Це передбачає аналіз наступних складових:

- Технологію за якою буде виготовлено товар;
- Існування таких технологій;
- Доступність цих технологій.

Таблиця 5.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Підвищення швидкодії системи	Використання додаткових ланок у контурі системи стабілізації	Наявна	Доступна
2	Підвищення точності системи	Вдосконалення алгоритму роботи системи	Потрібно розробити	Доступна
3	Підвищення максимальної ваги стабілізуючого обладнання	Використання потужнішого двигуна та інших елементів	Наявна	Доступна
4	Підвищення адаптивності системи	Використання іншого регулятора у системі стабілізації	Потрібно розробити	Доступна
5	Зменшення маси та габаритів системи	Використання інших, більш сучасних і дорогих компонентів елементної бази	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Підвищення адаптивності системи				

Висновки: За таблицею 5.3 обрано наступна технологія реалізації проекту – підвищення адаптивності системи, це є більш привабливим для користувачів, тому що систему легко буде підлаштовувати під різноманітні вхідні параметри і використовувати для різноманітного обладнання. Цю технологію потрібно розробити, що підвищує унікальність. Більшість описаних технологій реалізації є наявними та доступними.

### 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

5.3.1 Визначено ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проекту (табл. 5.4) [36], ринкові загрози, які можуть негативно вплинути на реалізацію проекту. Це дозволяє правильно спланувати напрямки розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища.

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	2000000 ум.од.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Якщо розглядати військову, авіа- та суднобудовну сферу, то це сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Існують (якщо розглядати військову сферу, а також авіа та суднобудівну)
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	46%

Висновки: Ринок є дуже привабливим для входження в зв'язку з гарною рентабельністю і загальним обсягом продаж. Існують певні обмеження, які стосуються просування товару на ринок військової сфери, де потрібно виконання специфічних умов на стандартизації та сертифікацію. Кількість основних гравців на ринку дорівнює 5, що є досить оптимальною конкуренцією. Висока рентабельність у галузі.

5.3.2 Визначено потенційні групи клієнтів, їх основні характеристики, на основі цього формується основний список вимог до товару (табл. 5.5) [36].

Таблиця 5.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Стабілізація обладнання різних масо-габаритних показників у просторі	Військові, кінематограф, розробка авіаційної і морської техніки.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Для військової сфери особливості пов'язані з стандартизацією і сертифікацією.</li> <li>- Для авіаційної і морської техніки важливіші точність і масо-габаритні показники.</li> <li>- Для кінематографа важливіше зручність та простота</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Точність системи</li> <li>- Швидкодія системи</li> <li>- Надійність</li> <li>- Адаптивність</li> <li>- Максимальна вага стабілізуючого обладнання</li> </ul>

Висновки: Визначено основні цільові аудиторії (військові, кінематограф, розробка авіаційної і морської техніки) та їх головні особливості, а також відмінності між головними вимогами до розробляємої системи у різних груп аудиторії. А також визначено основні вимоги споживачів до товару, які полягають у точності, швидкодії, надійності, адаптивності і максимальній вазі стабілізуючого обладнання.

5.3.3 Аналіз ринкового середовища. Складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 5.6-5.7). Фактори в таблиці подавати в порядку зменшення значущості [36].

Таблиця 5.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Зріст конкуренції	Виход на ринок нових конкурентів, які будуть пропонувати більш дешевий аналог	Втрата клієнтів
2	Зменшення попиту	Так як товар не орієнтований на широку публіку покупців, він може бистро перенасити ринок	Відмова від товару у зв'язку з ненадійністю
3	Вартість елементної бази	Збільшення сировини на компоненти системи	Відмова від товару внаслідок подорожчання
4	Якість	Погана якість продукту, товар не надійний	Відмова від товару
5	Зміни у сертифікації	Змінення стандартів сертифікації	Втрата клієнтів, для яких потрібен сертифікований товар

Висновки: У таблиці 5.6 описані основні види загроз, з яких самою головною загрозою обрано зріст конкуренції, що може призвести до відмови клієнтів від товару внаслідок появи більш дешевих аналогів, які зможуть запропонувати потенційному користувачу кращі або близькі характеристики. Інші загрози також є дуже важливими і потрібно їх враховувати, тому що їх наслідками може бути відмова користувачів від товару.

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання попиту	Можуть з'явитись нові потенційні покупці, або компанії-конкуренти вийдуть з ринку	Зростання виробництва

2	Необхідність модифікацій	Розширення можливостей системи за потребою користувачів	Вдосконалення та розширення можливостей системи за бажанням потенційних клієнтів
3	Нові потенційні групи клієнтів	Поява нових потенційних груп покупців	Аналіз потреб нової групи покупців
4	Здешевлення цін на компоненти	Зменшення цін на компоненти, внаслідок великої конкуренції між ними	Зменшення ціни на готову систему
5	Зменшення витрат на виробництво	Країни де менша вартість робочої сили	Зменшення ціни на готову систему

Висновки: У таблиці 5.7 описані основні види можливостей, з яких самими головними обрано збільшення попиту, що призведе до зростання виробництва, а як наслідок цього можливі будь-які інші можливості описані у таблиці можливості. Інші фактори відкривають можливості для вдосконалення та розширення можливостей системи, а також до зменшення ціни на готову систему.

5.3.4 Аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8) [36].

Таблиця 5.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - чиста	Невелика конкуренція у галузі	- Можливість швидко проводити вдосконалення, випереджаючи конкурентів - Можливість прогнозування змін на ринку
2. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Потенційні клієнти є по всьому світу	Вихід на міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - міжгалузева	Товар може використовуватись у різноманітних галузях	Аналіз зміни потреб для кожної потенційної групи клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Конкуренція товарів одного виду.	- Задоволення потреб клієнтів - Відповідність ринку
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Варіювання ціни внаслідок вибору користувачем функціональних особливостей	Пошук нових постачальників компонентів, які можуть запропонувати меншу ціну.

6. За інтенсивністю - марочна	Довіра до товару будується на репутації бренду	Проведення рекламних компаній
----------------------------------	---	----------------------------------

Висновки: Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку, їх вплив на діяльність підприємства, а також можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною. Визначено, що конкуренція у галузі є невеликою, і вона існує між товарами одного виду, є можливості виходу на міжнародний ринок, використання товару можливі у різноманітних сферах, а довіра до товару будується на репутації бренду.

5.3.5 Після проведення аналізу конкуренції проводиться аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю М. Портера) (табл. 5.9) [36].

Таблиця 5.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Карат DJI Feiyu	Zhiyun EVO Ikan	Analog Devices ELMO Invensense	Військова промисловість Кінематограф Авіабудівні підприємства	Безпосередні гіростабілізатори
Висновки:	Конкуренція у галузі не велика	Можливості виходу на ринок є, і вони не важкі. Існують потенційні конкуренти	Постачальники не диктують умови ринку	Клієнти практично не диктують умов, окрім військової промисловості та авіабудівної сфери, де існує обов'язкова сертифікація	Обмежень немає, тому що товар-замінник не є адаптивним. і існують обмеження в використанні.

Висновки: За результатами аналізу, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренція у галузі не велика, існують потенційні конкуренти. Постачальники не диктують умов на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів. Товари-замінники не зможуть задовільнити потреби користувачів. Проект повинен мати такі сильні сторони: адаптивність, точність, високу швидкість, надійність, відповідність потрібним стандартам, щоб отримувати сертифікацію.

5.3.6 На основі аналізу конкуренції, проведеного в п. 3.5 (табл. 5.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5.5) та факторів маркетингового середовища (табл. №5.6-5.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності (табл. 10) [36].

Таблиця 5.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Точність	Алгоритм системи керування який забезпечує необхідну точність
2	Адаптивність	Можливість використання системи при різноманітних умовах
3	Швидкодія	Висока швидкодія системи, як наслідок – якість вихідного корисного ефекту
4	Надійність	Система робить стабільно при різноманітних зовнішніх чинниках
5	Сертифікованість	Відповідність необхідним стандартам, для отримання сертифікатів, за потребу потенційних клієнтів

Висновки: Визначено основні фактори конкурентоспроможності, які полягають у точності, адаптивності, швидкодії, надійності і сертифікованості, а також наведено обґрунтування, яке показує сильні сторони розроблюваного проекту і як ці сильні сторони можуть бути корисні потенційному клієнту при використанні товару, для порівняння з товарами-конкурентами.

5.3.7 За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.11) [36].

Таблиця 5.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ДП						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Точність	17		2					
2	Адаптивність	20				0			
3	Швидкодія	20			1				
4	Надійність	15							3
5	Сертифікованість	19				0			

Висновки: У порівнянні з товаром-конкурентом були визначені наступні сильні сторони, які полягають у адаптивності, швидкодії і сертифікованості товару. Слабкі сторони полягають

у точності і надійності. Загалом товар є повністю конкурентоспроможним існуючим аналогом. Головні переваги полягають у високій швидкодії, відносно великій точності, а також у адаптивності до різноманітних факторів.

5.3.8 Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 5.12) [36].

Таблиця 5.12. SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Гарна адаптивність системи до різноманітних факторів</li> <li>2. Висока швидкодія системи</li> <li>3. Відповідність необхідним стандартам, для проходження сертифікації</li> <li>4. Можливості застосування у військовій сфері, авіа та суднобудуванні</li> <li>5. Висока максимальна вага обладнання яке стабілізується</li> </ol>	<p><b>Слабкі сторони</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Нижче точність відносно конкурентів</li> <li>2. Так як продукт новий, його надійність до кінця не перевірена</li> </ol>
<p><b>Можливості:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Зростання виробництва</li> <li>2. Вдосконалювання системи</li> <li>3. Вихід на міжнародний ринок</li> </ol>	<p><b>Загрози:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Відмова від товару, внаслідок неякісності</li> <li>2. Можливість не задоволення точністю системи у порівнянні з конкурентами, якщо цей чинник є найголовнішим для клієнта</li> </ol>

Висновки: Проведено SWOT-аналіз, за яким визначені можливі загрози і можливості, які передбачаються сильними та слабкими сторонами проекту. Загрози є, але вони більш пов'язані з тим, що продукт досить новий, і найвища точність у порівнянні з конкурентами на даному етапі не є головною метою, а більш увага приділяється адаптивності до різних факторів і високій швидкодії системи.

5.3.9 За SWOT-аналізом розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок. І визначено оптимальні строки реалізації. (табл. 5.13) [36].

Таблиця 5.13. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Конкуренція (максимізація відносного виграшу)	Середня	18 міс.
2	Кооперація (максимізація загального виграшу)	Висока	18 міс.



3	Індивідуалізм (максимізація власного виграшу)	Низька	24 міс.
4	Агресія (мінімізація виграшу іншого)	Низька	12 міс.

Висновки: Після проведеного аналізу було обрано альтернативу – кооперація, коли максимізується загальний виграш. Це пов'язано з високою ймовірністю отримання ресурсів, а також досить стислих строків на реалізацію. Інші альтернативи значно програють по ймовірності отримання ресурсів, а виграш по часу якщо розглядати таку альтернативу як агресія не корелює ймовірність отримання ресурсів.

#### 5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

5.4.1 Визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.14) [36].

Таблиця 5.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Військова промисловість	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	високий	низька	важко
2	Кінематограф	готові	високий	середня	просто
3	Авіаційне будування	Готові, якщо буде сертифікація	високий	низька	середньо
4	Судно будування	Готові, якщо буде сертифікація	високий	низька	середньо
5	Ракетобудування	Одразу не готові, треба певний час на перевірку	високий	низька	важко
Як цільові групи обрано: кінематограф, авіаційне будування, судно будування.					

Висновки: Проведено опис цільових груп потенційних клієнтів, визначено готовність споживачів сприйняти продукт, орієнтований попит в межах галузі, інтенсивність конкуренції і простоту входу. В якості цільових груп було обрано де готові сприйняти товар без та з сертифікацією, а також де середня і низька простота входу. Конкуренція в більшості галузей

низька, окрім кінематографу. Так як буде проводитися робота у декількох сферах, то обирається стратегія диференційованого маркетингу.

#### 5.4.2 Формування базової стратегії розвитку (табл. 5.15) [36].

Таблиця 5.15.Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Кооперація	Стратегія диференційованого маркетингу.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Використання нових досягнень</li> <li>- Задоволення вимог користувачів</li> </ul>	Стратегія диференціації

Висновки: Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації, яке передбачає надання товару важливих з точки зору споживача відмітних властивостей, які роблять товар особливим за товари-конкуренти за певними характеристиками, іноді зважаючи на не досить важливими характеристики товару. Так буде більше увагу приділено адаптивності і виокій швидкодії, але менше до точності.

#### 5.4.3 Вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.16) [36].

Таблиця 5.16.Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Проект не являється першопрохідцем	Так, будуть шукатись нові споживачі, аналізуватися нові групи потенційних клієнтів, а також переманюватися у конкурентів, за допомогою запропонування кращого продукту.	Не буде проводитись копіювання, а навпаки буде проводитись покращення і вдосконалення потрібних характеристик	Стратегія виклику лідера

Висновки: Обрано стратегію конкурентної поведінки – стратегія виклику лідера. Яка полягає у протистоянні лідеру, завдяки створенню конкурентоспроможного товару, який у

загальній кількості характеристик може зайняти найвищу позицію на ринку, і стати одним із самих привабливих для клієнтів. Також проект не являється прешопрхідцем на ринку. Основні характеристики товару конкурента не будуть копіюватись, а навпаки вдосконалюватись.

5.4.4 На основі вимог споживачів до постачальника та до продукту, в залежності від обраних стратегій конкурентної поведінки та базової стратегії розвитку розробляється стратегія позиціонування (табл. 5.17) [36].

Таблиця 5.17. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Точність системи	Стратегія диференціації	Якість	Високоточна, стабільна
2	Швидкодія	Стратегія диференціації	Вдосконалення	Швидка, малий час встановлення
3	Адаптивність до різноманітних умов	Стратегія диференціації	Універсальність	Адаптивна до будь-яких обставин, універсальна
4	Надійність продовж часу роботи	Стратегія диференціації	Якість	Надійна

Висновки: Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові слова: адаптивна, швидка, точна система. Це зроблено на основі аналізу головних вимог цільової аудиторії до розроблюваного товару, якими було обрано точність системи, швидкодію, адаптивність, а також надійність системи продовж часу роботи. Як базова стратегія обрано – стратегію диференціації

## 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

5.5.1 Формування маркетингової концепції товару, яку отримає споживач (табл. 5.18) [36].

Таблиця 5.18.Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Необхідність стабілізування різних за масо-габаритними показниками об'єктів у просторі	Система є дуже швидкою. Вона також адаптивна до різноманітним факторів. Має гарні показники точності. Середня ціна.	Швидкодія, адаптивність, надійність, висока точність, підтримка споживача, можливість широкого використання.

Висновки: Як видно з табл. 5.18, для потенційного споживача існує досить багато переваг, які полягають у високій швидкодії, адаптивності, відносно високій точності, надійності, підтримки споживача, можливостях широкого використання, відносно товарів-конкурентів. Деякі характеристики і можливості товари-конкуренти взагалі не можуть запропонувати у такій якості потенційному користувачеві.

#### 5.5.2 Трирівнева маркетингова модель товару: (табл. 5.19) [36].

Таблиця 5.19.Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Продукт дає можливість стабілізувати у просторі об'єкти з різними масо-габаритними показниками, що дуже сильно підвищує універсальність застосування. А завдяки використанню регулятора систему легко можна налаштовувати під різноманітні умови.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Точність	1. 0.03°	1. Тх
	2. Швидкодія	2. 0.2 с	2. Тх
	3. Максимальна маса об'єкту стабілізації	3. 10 кг	3. Тх
	4. Час безперервної роботи	4. 60 год	4. Тх
	Якість: сертифікати відповідності якості ISO		
Пакування			
Марка: проект «Система стабілізації обладнання з цифровим регулятором»			
III. Товар із підкріпленням	До продажу: Вибір комплектації за бажанням користувача		
	Після продажу: Гарантійне обслуговування, сервісна підтримка.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Завдяки патентування винаходу.			

Висновки: Зроблено опис трьох рівнів моделі товару, за яким легко зрозуміти призначення товару та які проблемні задачі він вирішує, основні властивості та технічні

характеристики які може запропонувати даний товар, основні сертифікації товару, а також яка підтримка може очікувати цільового користувача до та після продажу. Захист товару від копіювання буде зроблено завдяки патентуванню.

5.5.3 Визначення цінових меж для встановлення ціни на потенційний товар (табл. 5.20) [36].

Таблиця 5.20. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	1000-200 ум.од.	500 – 4000 ум.од.	10000-15000 ум.од.	Нижня межа: 2500 ум.од. Верхня межа: 3500 ум.од.

Висновки: Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною для запропонованих користувачу характеристик, і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Ціна базувалась на ціні розробки товару, а також на цінах основних компонентів елементної бази, яка використовується при збиранні готової системи. Визначено рівень доходів цільової групи споживачів, але треба зазначити, що ці системи не на широку аудиторію, тобто їх основними споживачами є компанії.

5.5.4 Визначення оптимальної системи збуту (табл. 5.21) [36].

Таблиця 5.21. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Рознічна закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача.	Канал одного рівня	Підприємства рознічної торгівлі
2	Оптова закупівля	Супровід товару на всьому етапі доставки до кінцевого споживача, з додатковими умовами і бонусами.	Дворівневий канал	Підприємства оптової торгівлі
3	Орендування	Консультація щодо використання обладнання	Канал нульового рівня	Підприємства від виробника

Висновки: Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту за специфікою закупівельної поведінки цільових клієнтів. Основні це рознічна закупівля, оптова

закупівля та орендування. Визначено функції збуту які повинен виконувати постачальник товару. Визначено через що оптимально реалізовувати збут при різних специфіках закупівельної поведінки цільових клієнтів.

#### 5.5.5 Розроблення концепції маркетингових комунікацій (табл. 5.22) [36].

Таблиця 5.22. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Отримання якісного універсального обладнання	Інтернет, телефон	Адаптивна, швидка, точна система	Приваблення нових цільових клієнтів	Розповісти про нову адаптивну, швидку і точну систему, за невелику ціну

Висновки: Розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів, за допомогою інтернету та телефону, які обрани основними каналами комунікацій, шляхом розміщення рекламного звернення в якому буде розповідатись про нову адаптивну до будь-яких умов, швидку і точну систему, за невелику ціну відносно товарів конкурентів.

### Висновки до розділу 5

При розробці стартап-проекту було зроблено всі етапи необхідні для правильного аналізу ринку, потенційних клієнтів, конкурентоспроможності, факторів ризику та можливостей, вибору правильних стратегій для впровадження стартап-проекту на ринок, для того щоб він став успішним.

Визначено основні напрямки застосування та вигоду для користувачів, а також сильні та слабкі сторони проекту у порівнянні з товарами-конкурентами. На основі цього було виявлено, що на товар існує досить великий попит у різноманітних сферах, таких, як авіабудування, морська справа, кінематограф, військова промисловість. Товар має досить гарні показники у порівнянні з товарами-конкурентами.

Проведено технологічний аудит проекту для вибору правильної технології реалізації ідеї проекту. Було обрано технологію - підвищення адаптивності системи, що є більш привабливим для користувачів, тому що система буде універсальною.

Проведено аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, за яким було виявлено, що ринок є дуже привабливим для входу, а середній рівень рентабельності у галузі

є високим. Визначено основні цільові аудиторії клієнтів, а також головні відмінності між ним. Основним ризиком загроз обрано зріст конкуренції, внаслідок чого може початися втрата клієнтів. А основною можливістю є зростання попиту, що призведе до збільшення виробництва. Проаналізовано основні риси конкуренції на ринку і визначено, що конкуренція у галузі є невеликою, є можливості виходу на міжнародний ринок, а використання товару можливе у різноманітних сферах. За результатами аналізу за моделлю М. Портера, визначено, що з оглядом на конкурентну ситуацію, на ринку можна працювати. Конкуренція у галузі не велика, існують потенційні конкуренти. Постачальники не диктують умов на ринку. Є специфічні умови з боку деяких потенційних клієнтів. Товари-замінники не зможуть задовільнити потреби користувачів. Визначено фактори конкурентоспроможності за якими проведено аналіз сильних та слабих сторін проекту: сильні сторони це адаптивність, швидкодія і сертифікованість товару. Слабкі сторони полягають у точності і надійності. Після проведеного SWOT – аналізу було обрано альтернативу ринкової поведінки – кооперація.

Розроблено ринкову стратегію проекту. Як цільові групи обрано: кінематограф, авіаційне будування, суднобудування. : Як базову стратегію розвитку було обрано стратегію диференціації. Обрано стратегію конкурентної поведінки – стратегія лідера. Сформульовано позицію власного проекту, це три ключові слова: адаптивна, швидка, точна система.

Розроблено маркетингову програму стартап-проекту, за якою встановлено, що для потенційного користувача товару є багато переваг, які не можуть запропонувати конкуренти. Встановлено межі ціни на товар, які дорівнюють від 2500 до 3500 ум.од. Ціна є оптимальною і знаходиться на рівні товарів-конкурентів. Встановлено глибини каналу збуту та оптимальні системи збуту і розроблено концепцію маркетингової комунікації, яка буде полягати у привабленні нових цільових клієнтів

Із зазначеного вище зроблено висновки, що подальша імплементація проекту є цілком доцільна.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд стану сучасних систем стабілізації обладнання. Проаналізувавши попередні дослідження, а також тенденції розвитку систем стабілізації обладнання, виявлено, що це є дуже важливим і перспективним напрямком досліджень. Актуальними є проблеми підвищення точності та швидкодії, а також розробка адаптивної системи стабілізації, для її експлуатації при різноманітних зовнішніх збуреннях та для різного класу обладнання. Перспективним є перехід від аналогової до цифрової системи, використання цифрових регуляторів, а саме розробка цифрового ПІД-регулятора.

2. Проведено аналіз системи стабілізації з неперервним регулятором. Побудовано частотні характеристики, проведено розрахунок стійкості системи, було визначено, що система є стійкою, а також побудовані частотні характеристики за якими визначено швидкодію системи, яка дорівнює  $t_P = 0,2c$  та визначено, що перерегулювання  $< 20\%$ , що є прийнятним результатом. Проведено моделювання системи стабілізації при типових впливах, для аналізу точності. Значення похибок лежать в діапазоні  $[4 \cdot 10^{-5} \dots 0,022^\circ]$ . При сталому, швидкісному, гармонічному впливі та впливі типу «білий шум» існує невелике відхилення, а при динамічному впливі похибка прямує до нескінченності.

3. Було проведено розрахунок параметрів ПІД-регулятора на основі попереднього аналогового регулятора. За допомогою стандартного блоку «Discrete PID Controller» було створено цифровий ПІД-регулятор. Побудовані частотні та часові характеристики, які були порівняння з відповідними характеристиками системи з неперервним регулятором, і визначено, що вони не погіршились. Для аналізу системи стабілізації з цифровим регулятором було проведено моделювання на типові впливи, внаслідок яких було визначено, що показники точності не погіршились. Визначено, що використання цифрового ПІД-регулятора з розрахованими параметрами є цілком доцільно, тому що не погіршились основні параметри системи, такі, як швидкодія та точність.

4. Проведено дослідження та порівняльний аналіз характеристик системи стабілізації при випадкових впливах. В якості випадкових впливів було розглянуто різні класи доріг. Які відрізняються параметрами мікропрофілю. Після проведення досліджень для системи стабілізації з неперервним регулятором та системи стабілізації з цифровим ПІД-регулятором, було розраховані СКВ вихідних сигналів та зроблено їх порівняння, яке показало, що обидві системи дають практично однакові результати, які є прийнятними.

5. Таким чином система стабілізації обладнання з цифровим регулятором може бути використана як основа для подальшої розробки адаптивної системи стабілізації.

6. Було проведено розробку стартап-проекту.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Милехин Л.Н. Прикладная теория гироскопов: курс лекций./Л.Н. Милехин – Казань, 2013. – 91с.
2. Бурау Н.І. Аналіз напрямків удосконалення систем стабілізації та наведення обладнання на рухомих об'єктах / Н.І.Бурау, А.І. Вознюк, В.В. Цисарж // Вісник Інженерної академії України. – 2015. - №3. – С. 73-77.
3. Сущенко О.А. Методика выбора гироскопического измерителя для системы стабилизации информационно-измерительных устройств / О.А. Сущенко, С.Г. Егоров, С.В. Карасев // Електроніка та системи управління. – 2011. – №4(30) – С.63–67
4. Дегтярев М.И. Информационно-измерительная система стабилизации и наведения линии визирования на динамически настраиваемом гироскопе: авторефер. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.11.16 – Информационно-измерительные и управляющие системы / М.И. Дегтярев. – Тула, 2013. – 16с.
5. Матвеев В.В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. – 280с.
6. Смирнов В.А. Способ управления исполнительными двигателями системы стабилизации и наведения линии визирования, обеспечивающий расширенный диапазон углов наведения / В.А. Смирнов, В.С. Захариков // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула, 2011. – Вып. 2. – С. 126–130.
7. Пуйда В.Я. Розроблення структурної моделі мікропроцесорного під-регулятора [Електронний ресурс] / В.Я. Пуйда, Н.Т. Мандзевич. – 2014.– Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPKSM\\_2014\\_806\\_37.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/VNULPKSM_2014_806_37.pdf).
8. Парамонова А. А. Синтез высокоточных систем стабилизации и наведения: авторефер. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.13.01 – “Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность, промышленная безопасность и экология)” / А. А. Парамонова. – Тула, 2012. – 16с.
9. Design a Robust PI Controller for Line of Sight Stabilization System / [Amr A. Roshdy, Chengzhi Su, Hany F. Mokbel et al.] // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – 2012. – Volume 2, Issue 2. – pp. 144–148.
10. Кузнєцов Б.І. Синтез і дослідження системи наведення і стабілізації озброєння легко броньованих машин з нейромережевим регулятором на основі моделі авто регресії

- з ковзаючим середнім/ Б.І. Кузнецов, Т.Ю. Василець, О.О. Варфоломійєв// Системи озброєння і військова техніка. – 2010. - №4(24). – С.118-122.
11. Безвесільна О.М. Опис роботи стабілізатора складної навігаційної системи/ О.М. Безвесільна, В.Г. Цірук, В.П. Квасніков, Л.О. Чепюк// Вісник Інженерної академії України. – 2015. - №1. – С. 78-84.
  12. Вознюк А. І. Аналіз параметрів системи непрямої стабілізації рухомих об'єктів під час руху пересіченою місцевістю / А. І. Вознюк. // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування. – 2017. – №54(2). – С. 20–26. – ISSN 0201-744X, ISSN 0321-2211.
  13. Сущенко О. А. Особливості параметричної оптимізації стохастичної системи стабілізації та визначення курсу / О. А. Сущенко, Д. О. Луцко. // Електроніка та системи управління. – 2010. – №2(24). – С. 60–65. – ISSN 1990-5548.
  14. Безвесільна О. М. Коріолісовий вібраційний гіроскоп, як чутливий елемент комплексу управління системи стабілізації / О. М. Безвесільна, В. Г. Цірук, А. Г. Ткачук. // Науковий журнал "Технологічні комплекси". – 2014. – №2(10). – С. 142–147.
  15. Сущенко О. А. Дослідження методів  $H_\infty$ -синтезу систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв / О. А. Сущенко. // Вісник НАУ. – 2012. – №3. – С. 64–68. – ISSN 1813-1166.
  16. Зімчук І. В. Синтез алгоритмів цифрового управління для автоматичних слідкувальних систем / І. В. Зімчук, В. І. Іщенко, І. О. Канкін. // System Research & Information Technologies. – 2015. – №1. – С. 32–38. – ISSN 1681-6048.
  17. Жеребко В. А. Розробка програмної моделі нейромережевого ПД-регулятора в середовищі LabVIEW / В. А. Жеребко, В. В. Афансьєв, А. С. Лясковський. // Проблеми програмування. – 2011. – №1. – С. 99–108. – ISSN 1727-4907.
  18. Лобода О. І. Нечеткі адаптивні ПД-регулятори та методика їх налаштування / О. І. Лобода. // Науковий вісник ТДАТУ. – 2017. – Вип. 7, Т.1 – С. 162–167.
  19. Моисеев А. Н. Расчет коэффициентов классических регуляторов методом генетических алгоритмов в среде MatLab / А. Н. Моисеев, Ю. А. Цепковский. // Вісник КДПУ. – 2006. – №3(38). – С. 140–144.
  20. Безвесільна О. М. Дослідження впливу кутової швидкості обертання Землі на роботу навігаційних елементів гіростабілізатора / О. М. Безвесільна, В. Г. Цірук, Л. О. Чепюк. // Вісник ЖДТУ. – 2014. – №3(70). – С. 68–72.
  21. Репнікова Н. Б. Синтез цифрових систем управління з ПД-регуляторами / Н. Б. Репнікова, В. Ю. Федулова, Т. Я. Богодьорова. // Системи обробки інформації. – 2008. – №7(74). – С. 112–113. – ISSN 1681-7710.

22. Пекуровський Г. В. Налаштування параметрів ПД-регулятора при синтезі адаптивної системи автоматичного управління активною компенсацією вібрації. / Г. В. Пекуровський, О. В. Барабаш. // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – №4(32). – С. 139–142.
23. Кузнєцов Б. І. Система наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин з нейромережевим регулятором / Б. І. Кузнєцов, Т. Ю. Василець, О. О. Варфоломєєв. // Системи озброєння і військова техніка. – 2008. – №1(13). – С. 112–116.
24. Ивойлов А. Ю. Разработка системы автоматической стабилизации в вертикальном положении двухколесной платформы / А. Ю. Ивойлов, В. А. Жмудь, В. Г. Трубин. // Автоматика и программная инженерия. – 2014. – №2(8). – С. 15–21.
25. Ивойлов А. Ю. О применение МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота / А. Ю. Ивойлов. // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – №3(89). – С. 32–51.
26. Скороспешкин М. В. Адаптивная система автоматического регулирования / М. В. Скороспешкин, В. Н. Скороспешкин. // Интернет-журнал "НАУКОВЕДЕНИЕ". – 2014. – №2. – С. 1–10.
27. Моделювання дорожньої поверхні для розрахунку динаміки руху транспортних засобів / В. О. Богомолів, В. І. Клименко, А. І. Шилов, Р. В. Алексєєв. // Автомобільний транспорт. – 2011. – №29. – С. 37–42.
28. Голінко І. М. Налаштування системи із цифровим регулятором на заданий показник коливності [Електронний ресурс] / І. М. Голінко, Ю. М. Ковриго, А. І. Кубрак // ААЭКС, №1(23). – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <http://aaecs.org/golnko-m-kovrigo-yum-kubrak-a-nastroika-sistemi-z-cifrovim-regulyatorom-na-zadanii-pokaznik-kolivnost.html>.
29. Голінко І. М. Налаштування системи керування за імпульсною характеристикою об'єкта [Електронний ресурс] / І. М. Голінко, Ю. М. Ковриго, А. І. Кубрак // ААЭКС, №1(25). – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <http://aaecs.org/golnko-m-kovrigo-yum-kubrak-a-nastroika-sistemi-keruvannya-za-impulsnoyu-harakteristikoyu-obkta.html>.
30. Осовцев А. В. Аналіз систем стабілізації обладнання на рухомих об'єктах / А. В. Осовцев, Н. І. Бурау, А. І. Вознюк. // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси. – 2016. – №9. – С. 220–222.
31. Электродвигатели ЭДМ-14, ЭДМ-20 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://chelindustry.ru/view2.php?id\\_kat=5&id\\_raz=22&id\\_prod=321&tt=72&rr=7](https://chelindustry.ru/view2.php?id_kat=5&id_raz=22&id_prod=321&tt=72&rr=7).

32. ПИД-регулятор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:  
<http://autoworks.com.ua/teoreticheskie-svedeniya/pid-regulyator/>.
33. Осовцев А.В. Порівняння цифрового та аналогового регулятора у системі стабілізації обладнання / А.В. Осовцев, А.І. Вознюк // Погляд у майбутнє приладобудування: Збірник статей XI науково-практичної конференції студентів та аспірантів/ Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2018. — С. 45-48.
34. Аналіз впливу нерівностей місцевості на ефективність стабілізації обладнання рухомого об'єкта / Н. І.Бурау, А. І. Вознюк, А. В. Осовцев, А. С. Шаблій. // Вісник інженерної академії України. – 2017. – №2. – С. 220–225.
35. Погорелов Д.Ю. Программный комплекс «Универсальный механизм» [Электронный ресурс] / Д.Ю. Погорелов – Режим доступа:  
<http://www.universalmechanism.com/pages/index.php?id=3>
36. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

## Додаток А

### 1. Код програми для перевірки стійкості за критерієм Гурвіца:

```
% Перевірка стійкості
clc
clear all
close all

% Вхідні параметри системи
I = 751;
kerr = 6;
kmot = 1/0.048;
kred = 1/I;
kpr = 10;
Tin = 0.01;
KUM = 80;
k = kerr*kmot*kred*KUM/Tin;
T1 = 0.05;
T2 = 0.001;
Tm = 0.1;
Tar = 2e-3;
T5 = kpr * Tin;

%Критерій Гурвіца
a25 = Tar*Tm*T2
a24 = T2*Tm + Tar*T2 + Tar*Tm
a23 = T2 + Tm + Tar
a22 = (1 + k*T1*T5)
a21 = k*(T5 + T1)
a20 = k
A2 = [a24 a22 a20 0 0; a25 a23 a21 0 0; 0 a24 a22 a20 0; 0 a25 a23 a21 0; 0 0 a24 a22 a20]
B2 = [a24 a22 a20 0; a25 a23 a21 0; 0 a24 a22 a20; 0 a25 a23 a21]
C2 = [a24 a22 a20; a25 a23 a21; 0 a24 a22]
D2 = [a24 a22; a25 a23]
dt25 = det(A2)
dt24 = det(B2)
dt23 = det(C2)
dt22 = det(D2)
dt21 = a24

%Корені рівняння
gurv = [(Tar*Tm*T2) (T2*Tm + T2*Tar + Tm*Tar) (T2 + Tm + Tar) (1 +
k*(T1*T5)) ((T1 + T5)*k) k]
korni = roots(gurv)
```

### 2. Код програми для побудови частотних характеристик:

```
clc
clear all
close all
```

```

% Вхідні параметри системи
I = 751;
kerr = 6;
kmot = 1/0.048;
kred = 1/I;
kpr = 10;
Tin = 0.01;
KUM = 80;
k = kerr*kmot*kred*KUM/Tin;
T1 = 0.05;
T2 = 0.001;
Tm = 0.1;
Tar = 2e-3;
T5 = kpr * Tin;
w = logspace(-2,4,250);

p = j*w;
W = k*(1 + T5*p).*(1 + T1*p)./(p.^2.*(T2*p + 1).*(1 + (Tm + Tar)*p + Tar*Tm*p.^2));
N = abs(W);
Fi = angle(W);
Fi1 = unwrap(Fi);
L = 20*log10(N);

% Графік частотних характеристик
figure(1)
subplot(2,1,1)
semilogx(w,L);
title('ЛАЧХ');
ylabel('N(\omega), дБ');
xlabel('\omega, c-1');
grid;
subplot(2,1,2);
semilogx(w,Fi1*180/pi,w,-180,w,-270);
title('ЛФЧХ');
ylabel('\phi(\omega), дБ');
xlabel('\omega, c-1');
grid;

```

### 3. Код програми для побудови часових характеристик:

```

clc
clear all
close all

% Вхідні параметри системи
I = 751;
Mload = 12;
Kerr = 6;
Kenc = 1;
Kpr = 10;
Kmot = 1/0.048;
Tin = 0.01;

```

```

T1 = 0.05;
T2 = 0.001;
Tm = 0.1;
Tar = 2e-3;
b = 4800;
KUM = 80;

Td = 0.001; % Час дискретизації

%Передача даних в Simulink
sim('chasovi_char.slx') % Модель системи у Simulink

% Графік перехідної характеристики
figure(1);
plot(P);
grid;
xlabel('Час, с');
ylabel('Амплітуда, град');
title('Перехідна характеристика');

% Графік імпульсної характеристики
figure(2)
plot(I);
grid;
xlabel('Время, с');
ylabel('Амплитуда, град');
title('Импульсна характеристика');

```

#### 4. Код програми для моделювання системи стабілізації при типових впливах:

```

clc
clear all
close all

%Начальные значения
I = 751;
Mload = 12;
Kerr = 6;
Kenc = 1;
Kpr = 10;
Kmot = 1/0.048;
Tin = 0.01;
T1 = 0.05;
T2 = 0.001;
Tm = 0.1;
Tar = 2e-3;
b = 4800;
KUM = 80;

Td = 0.001; % Час дискретизації

% Коефіцієнти ПД-регулятора

```

$$K_p = K_{pr} + ((T_1 - T_2)/T_{in})$$

$$K_i = 1/T_{in}$$

$$K_d = K_{pr} * (T_1 - T_2) - (T_2 * (T_1 - T_2)/T_{in})$$

```
sim('typovi_zburenya.mdl')
```

```
%Побудова графіків
```

```
figure(1);
plot(out_1);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на стале збурення', 'FontSize', 14);
figure(2);
plot(out_2);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на швидкісне збурення', 'FontSize', 14);
figure(3);
plot(out_3);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на швидкісне збурення', 'FontSize', 14);
figure(4);
plot(out_4);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на динамічне збурення', 'FontSize', 14);
figure(5);
plot(out_5);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на динамічне збурення', 'FontSize', 14);
figure(6);
plot(out_6);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на гармонічне збурення', 'FontSize', 14);
figure(7);
plot(out_7);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на збурення типу «білий шум»', 'FontSize', 14);
```



## Додаток Б

### 1. Код програми для побудови частотних характеристик:

```

clc
clear all
close all

% Вхідні параметри системи
I = 751;
kerr = 6;
kmot = 1/0.048;
kred = 1/I;
kpr = 10;
Tin = 0.01;
KUM = 80;
k = kerr*kmot*kred*KUM;
T1 = 0.05;
T2 = 0.001;
Tm = 0.1;
Tar = 2e-3;
w = logspace(-2,4,250);

% Коефіцієнти ПД-регулятора
Kp = kpr + ((T1-T2)/Tin)
Ki = 1/Tin
Kd = kpr*(T1-T2)-(T2*(T1-T2)/Tin)

p = j*w;

W = k*((Kp*T2 + Kd)*p.^2 + (Ki*T2 + Kp)*p + Ki)./(p.^2.*(T2*p + 1).*(1 + (Tm + Tar)*p +
Tar*Tm*p.^2));
N = abs(W);
Fi = angle(W);
Fi1 = unwrap(Fi);
L = 20*log10(N);

% Графік частотних характеристик
figure(1);
subplot(2,1,1);
semilogx(w,L);
title('ЛАЧХ');
ylabel('N(\omega), дБ');
xlabel('\omega, c-1');
grid;
subplot(2,1,2);
semilogx(w,Fi1*180/pi,w,-180,w,-270);
title('ЛФЧХ');
ylabel('\phi(\omega), дБ');
xlabel('\omega, c-1');
grid;

```

## 2. Код програми для побудови часових характеристик:

```

clc
clear all
close all

% Вхідні параметри системи
I = 751;
Mload = 12;
Kerr = 6;
Kenc = 1;
Kpr = 10;
Kmota = 1/0.048;
Tin = 0.01;
T1 = 0.05;
T2 = 0.001;
Tm = 0.1;
Tar = 2e-3;
b = 4800;
KUM = 80;

Td = 0.001; % Час дискретизації

% Коефіцієнти ПІД-регулятора
Kp = Kpr + ((T1-T2)/Tin)
Ki = 1/Tin
Kd = Kpr*(T1-T2)-(T2*(T1-T2)/Tin)

% Передача даних в Simulink
sim('chasovi_char_pid.slx') % Модель системи у Simulink

% Графік перехідної характеристики
figure(1);
plot(P);
grid;
xlabel('Час, с');
ylabel('Амплітуда, град');
title('Перехідна характеристика');

% Графік імпульсної характеристики
figure(2)
plot(I);
grid;
xlabel('Время, с');
ylabel('Амплитуда, град');
title('Імпульсна характеристика');

```

## 3. Код програми для моделювання системи стабілізації при типових впливах:

```

clc
clear all
close all

```

```

%Начальні значення
I = 751;
Mload = 12;
Kerr = 6;
Kenc = 1;
Kpr = 10;
Kmot = 1/0.048;
Tin = 0.01;
T1 = 0.05;
T2 = 0.001;
Tm = 0.1;
Tar = 2e-3;
b = 4800;
KUM = 80;

sim('typovi_zburenya_pid.mdl')

%Побудова графіків
figure(1);
plot(out_1);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на стале збурення', 'FontSize', 14);
figure(2);
plot(out_2);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на швидкісне збурення', 'FontSize', 14);
figure(3);
plot(out_3);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на швидкісне збурення', 'FontSize', 14);
figure(4);
plot(out_4);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на динамічне збурення', 'FontSize', 14);
figure(5);
plot(out_5);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);
grid;
title('Реакція системи на динамічне збурення', 'FontSize', 14);
figure(6);
plot(out_6);
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);
ylabel('$$\varphi, \circ$$','interpreter','latex', 'FontSize', 14);

```

```
grid;  
title('Реакція системи на гармонічне збурення', 'FontSize', 14);  
figure(7);  
plot(out_7);  
xlabel('Час t, c', 'FontSize', 14);  
ylabel('$$\varphi, \circ$$', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 14);  
grid;  
title('Реакція системи на збурення типу «білий шум»', 'FontSize', 14);
```

## Додаток В

1. Код програми для моделювання та аналізу реакції системи стабілізації з аналоговим регулятором на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта:

```
clc
clear all
close all

% Рівень нерівності
var = 2e-6; % Клас А
% var = 3e-5; % Клас В
% var = 2e-4; % Клас D
% var = 5e-4; % Клас D

% Вхідні параметри системи
I = 751;
Mload = 12;
Kerr = 6;
Kenc = 1;
Kpr = 10;
Kmot = 1/0.048;
Tin = 0.01;
T1 = 0.05;
T2 = 0.001;
Tm = 0.1;
Tar = 2e-3;
b = 4800;
KUM = 80;

%Передача даних в Simulink
sim('vip_vpliv.slx') % Модель системи у Simulink

% Графік випадкового процесу
figure(1);
plot(J);
xlabel('Час, с', 'FontSize', 14);
ylabel('F(t), м', 'FontSize', 14);
title('Випадковий процес', 'FontSize', 14);
grid;
% Графік відпрацьованого сигналу
figure(2);
plot(K.Time,K.Data);
xlabel('Час, с', 'FontSize', 14);
ylabel('phi_{вих}(t), м', 'FontSize', 14);
title('Відпрацьований сигнал', 'FontSize', 14);
grid;

M = mean(K.Data) % Середнє значення
SKO_mat = std(K.Data) % СКО
```

```

% Спектр
dt = 0.01;
Fs = 1/dt
N = length(K.Data)
ff = ((0:floor(N/2))+1)/N*Fs;
qq=fft(K.Data)/N;
qqq=qq.*conj(qq);
figure(3)
plot(ff, 2*abs(qqq((0:floor(N/2)) + 1)));
xlabel('Частота, Гц', 'FontSize', 14);
xlim([0 10]);
ylabel('S_\phi(f), м^2', 'FontSize', 14);
title('Спектр', 'FontSize', 14);
grid;

```

2. Код програми для моделювання та аналізу реакції системи стабілізації з цифровим регулятором на випадкові збурення, обумовлені нерівностями поверхні руху об'єкта:

```

clc
clear all
close all

% Рівень нерівності
var = 2e-6; % Клас А
% var = 3e-5; % Клас В
% var = 2e-4; % Клас D
% var = 5e-4; % Клас D

% Вхідні параметри системи
I = 751;
Mload = 12;
Kerr = 6;
Kenc = 1;
Kpr = 10;
Kmot = 1/0.048;
Tin = 0.01;
T1 = 0.05;
T2 = 0.001;
Tm = 0.1;
Tar = 2e-3;
b = 4800;
KUM = 80;

Td = 0.001; % Час дискретизації

% Коефіцієнти ПД-регулятора
Kp = Kpr + ((T1-T2)/Tin)
Ki = 1/Tin
Kd = Kpr*(T1-T2)-(T2*(T1-T2)/Tin)

%Передача даних в Simulink

```

```
sim('vip_vpliv_pid.slx') % Модель системи у Simulink
```

```
% Графік випадкового процесу
```

```
figure(1);
```

```
plot(J);
```

```
xlabel('Час, с', 'FontSize', 14);
```

```
ylabel('F(t), м', 'FontSize', 14);
```

```
title('Випадковий процес', 'FontSize', 14);
```

```
grid;
```

```
% Графік відпрацьованого сигналу
```

```
figure(2);
```

```
plot(K.Time,K.Data);
```

```
xlabel('Час, с', 'FontSize', 14);
```

```
ylabel('\phi_{вих}(t), м', 'FontSize', 14);
```

```
title('Відпрацьований сигнал', 'FontSize', 14);
```

```
grid;
```

```
M = mean(K.Data) % Середнє значення
```

```
SKO_mat = std(K.Data) % СКО
```

```
% Спектр
```

```
dt = 0.01;
```

```
Fs = 1/dt
```

```
N = length(K.Data)
```

```
ff = ((0:floor(N/2))+1)/N*Fs;
```

```
qq=fft(K.Data)/N;
```

```
qqq=qq.*conj(qq);
```

```
figure(3)
```

```
plot(ff, 2*abs(qqq((0:floor(N/2)) + 1)));
```

```
xlabel('Частота, Гц', 'FontSize', 14);
```

```
xlim([0 10]);
```

```
ylabel('S_{\phi(f), м^2', 'FontSize', 14);
```

```
title('Спектр', 'FontSize', 14);
```

```
grid;
```